

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO FILIPE DE REZENDE MARTINS

ESTUDO DO EFEITO DO TIPO DE PREENCHIMENTO NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE PEÇAS FABRICADAS POR *FUSED DEPOSITION MODELLING*
USANDO O COMPÓSITO PLA-FIBRA DE CARBONO

CURITIBA

20 DE JULHO DE 2021

JOÃO FILIPE DE REZENDE MARTINS

ESTUDO DO EFEITO DO TIPO DE PREENCHIMENTO NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE PEÇAS FABRICADAS POR *FUSED DEPOSITION MODELLING*
USANDO O COMPÓSITO PLA-FIBRA DE CARBONO

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção,
no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal
do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Oscar Drozda.

CURITIBA
20 DE JULHO DE 2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

M386e

Martins, João Filipe de Rezende

Estudo do efeito do tipo de preenchimento no comportamento mecânico de peças fabricadas por Fused Deposition Modelling usando o compósito PLA-fibra de carbono [recurso eletrônico] / João Filipe de Rezende Martins. – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2021.

Orientador: Fabiano Oscar Drozda

1. Fundição. 2. Modelagem (Fundição). 3. Impressão 3D. 4. Modelagem de Deposição Fundida. I. Universidade Federal do Paraná. II. Drozda, Fabiano Oscar. III. Título.

CDD: 671.2

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO - 40001016070P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **JOAO FILIPE DE REZENDE MARTINS** intitulada: **ESTUDO DO EFEITO DO TIPO DE PREENCHIMENTO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PEÇAS FABRICADAS POR FUSED DEPOSITION MODELLING USANDO O COMPÓSITO PLA-FIBRA DE CARBONO**, sob orientação do Prof. Dr. **FABIANO OSCAR DROZDA**, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Maio de 2021.

Assinatura Eletrônica
27/05/2021 18:34:51.0
FABIANO OSCAR DROZDA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
02/06/2021 15:44:47.0
MARCOS AUGUSTO MENDES MARQUES
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
31/05/2021 16:03:15.0
MARCELL MARIANO CORRÊA MACENO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
14/06/2021 11:06:30.0
SIDNEI ANTONIO PIANARO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu tio, Geraldo Pougy, por sempre ter me incentivado aos estudos e ter proporcionado isso na minha trajetória.

Gostaria de agradecer ao meu amigo, Fernando Sartori, pelo o incentivo e suporte para realizar esse mestrado.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador, Fabiano Drozda, pelo comprometimento e tenacidade!

RESUMO

A fabricação de peças com geometrias complexas é possível utilizando tecnologias de manufatura aditiva (MA). Devido à versatilidade desse recurso, a MA tem sido empregada em uma variedade de aplicações como automotiva, aeroespacial, biomédica e industrial. A MA por modelagem pela deposição de filamentos fundidos ou *fused deposition modelling* (FDM) é atualmente o processo mais acessível de impressão 3D, e utiliza uma grande abrangência de materiais poliméricos puros e reforçados. Devido à natureza anisotrópica dessas peças, o avanço na compreensão do seu comportamento sob demanda mecânica é fundamental para o aumento na confiabilidade e utilização de peças 3D. Com os demais parâmetros, para fabricação em 3D, fixados avaliou-se as características mecânicas de tensão máxima, ductilidade, módulo elástico e tenacidade dos preenchimentos Octeto, Cúbico e Giróide nas densidades de preenchimento de 25%, 50% e 75% em corpos de prova submetido ao ensaio de tração. Os corpos de prova foram fabricados por impressão 3D FDM, utilizando filamentos de ácido polilático (PLA) reforçados com 15% de fibra de carbono. Os ensaios de tração foram executados por um laboratório especializado de acordo com a norma ASTM D638 e os corpos de prova foram do Tipo III. Os corpos de prova com 25% de preenchimento apresentaram uma fratura frágil. Os com 50% e 75% de preenchimento romperam de maneira dúctil e apresentaram um valor de tensão máxima similar em aproximadamente 18,5 Mpa. Os com 75% de preenchimento apresentaram o maior alongamento antes da ruptura, com destaque para o preenchimento Giróide com 6,89% de deformação. O maior valor de tensão máxima específica (tensão/massa) foi obtido nas amostras com 50% de preenchimento.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Impressão 3D. Preenchimento. FDM. Tração.

ABSTRACT

The fabrication of parts with complex geometries is possible using additive manufacturing (AM) technologies. Due to the versatility of this resource, AM has been used in a variety of applications such as automotive, aerospace, biomedical and industrial. MA or fused deposition modeling (FDM) is currently the most affordable 3D printing process and uses a wide range of pure and reinforced polymeric materials. Due to the anisotropic nature of these parts, advancing the understanding of their behavior under mechanical demand is fundamental for increasing the reliability and utilization of 3D parts. With the other parameters, for 3D FDM fabrication, fixed, the mechanical characteristics of maximum tension, ductility, elastic modulus and tenacity of the Octet, Cubic and Gyroid infills with the filling densities of 25%, 50% and 75% in specimens submitted to the tensile tests. The specimens were manufactured by 3D FDM printing, using polylactic acid (PLA) filaments reinforced with 15% carbon fiber. The tensile tests were performed by a specialized laboratory in accordance with ASTM D638 standard and the specimens were of Type III. The specimens with 25% infill presented a brittle fracture. Those with 50% and 75% infill ruptured in a less fragile way and had a similar maximum stress value of approximately 18.5 Mpa. Those with 75% of infill showed the greatest elongation before rupture, with the Gyroid infill pattern obtaining 6.89% of deformation before rupturing. The highest value of specific maximum stress (tension/mass) was obtained in samples with 50% filling

Key words: Additive Manufacturing. 3D Printing. Filling. FDM. Tensile.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE IMPRESSORAS FDM	26
FIGURA 2 - ESCRITA DIRETA COM TINTA	27
FIGURA 3 - PRINCÍPIO FUNDAMENTAL DO SLA	28
FIGURA 4 - PRINCÍPIO FUNDAMENTAL DO DLP	29
FIGURA 5 - FUNCIONAMENTO DA TECNOLOGIA LOM	29
FIGURA 6 - SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER	30
FIGURA 7 - JATEAMENTO DE FOTOPOLÍMERO	31
FIGURA 8 - JATEAMENTO DE AGLUTINANTE	32
FIGURA 9 - IMPRESSORA 3D ESTILO REPRAP	33
FIGURA 10 - DADOS DOS RESULTADOS DA EMPRESA STRATASYS	34
FIGURA 11 - REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO DE IMPRESSÃO POR FDM	35
FIGURA 12 - POSSÍVEIS SITUAÇÕES DE ADESÃO	37
FIGURA 13 - SISTEMA DE SUPORTE	38
FIGURA 14 - IMPRESSORA FDM COM DOIS CABEÇOTES E BICOS INJETORES	39
FIGURA 15 - PLATAFORMA DE IMPRESSÃO	40
FIGURA 16 – IMPRESSORAS DE SISTEMA PROPRIETÁRIO (FECHADO) E ABERTO	42
FIGURA 17 - ETAPAS DA PREPARAÇÃO DO ARQUIVO PARA IMPRESSÃO 3D FDM	43
FIGURA 18 - MODELO VIRTUAL 3D DO OBJETO	43
FIGURA 19 - CONVERSÃO PARA STL	44
FIGURA 20 - INSERÇÃO NO SOFTWARE SLICER	45
FIGURA 21 - OBTENÇÃO DO G-CODE PARA IMPRESSÃO	46

FIGURA 22 -PEÇA IMPRESSA EM 3D	46
FIGURA 23 - PEÇAS COM VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE PREENCHIMENTO..	48
FIGURA 24 - EXEMPLOS DE TIPOS E DENSIDADES DE PREENCHIMENTO INTERNO.....	49
FIGURA 25 - ESTRUTURA DE GRADE	50
FIGURA 26 - ESTRUTURA DE TRIANGULOS.....	51
FIGURA 27 - ESTRUTURA DE TRI-HEXÁGONOS	52
FIGURA 28 - CUBO EM 3D	53
FIGURA 29 - ORIENTAÇÃO DA IMPRESSÃO	54
FIGURA 30 - ESPESSURA DA CAMADA	55
FIGURA 31 - ALTURAS DE CAMADAS	56
FIGURA 32 - TEMPERATURA DE EXTRUSÃO	57
FIGURA 33 - ÂNGULO DE VARREDURA DURANTE A DEPOSIÇÃO	58
FIGURA 34 - TEMPERATURA DA PLATAFORMA DE IMPRESSÃO	59
FIGURA 35 – COMPOSIÇÃO DA CASCA DO MODELO	61
FIGURA 36 - EMPENAMENTO.....	62
FIGURA 37 - DELAMINAÇÃO.....	64
FIGURA 38 - DESLOCAMENTO DE CAMADAS	66
FIGURA 39 - TEIAS NO PREENCHIMENTO INTERNO	67
FIGURA 40 - SUPERAQUECIMENTO E COLAPSO	69
FIGURA 41 - RESSALTO NAS BORDAS DA BASE.....	70
FIGURA 42 - TIPOS DE NIVELAMENTO DE BICO EXTRUSOR.....	71
FIGURA 43 - ONDULAÇÕES.....	71
FIGURA 44 – EXTRUSÃO EXCESSIVA.....	73
FIGURA 45 - PRINCIPAIS POLIMEROS E SUAS DIFERENÇAS	75
FIGURA 46 - FÓRMULA QUÍMICA DA POLIMERIZAÇÃO DO ÁCIDO LÁTICO	77

FIGURA 47 - PORCENTAGEM DE FIBRAS DE CARBONO X TENSÃO MÁXIMA..	79
FIGURA 48 - ESTRUTURA LAMELAR POLIMÉRICA	82
FIGURA 49 - TENSÃO ENTRE PLANOS DE MATERIAL ANISOTRÓPICO	85
FIGURA 50 - LIMITE DE ESCOAMENTO DE POLÍMEROS EM ENSAIOS TRAÇÃO	87
FIGURA 51 - CÁLCULO DA TENACIDADE PELA REGRA DOS TRAPÉZIOS	89
FIGURA 52 - ENSAIO DE TRAÇÃO	91
FIGURA 53 - COMPARAÇÃO ENTRE DOIS CORPOS DE PROVA	93
FIGURA 54 - PEÇAS IMPRESSAS EM IMPRESSORA FDM.....	94
FIGURA 55 - COMPARATIVO	95
FIGURA 56 - ESTUDO DA CONCENTRAÇÃO IDEAL DE FIBRAS DE CARBONO	96
FIGURA 57 - ATIVIDADES DESENVOLVIDAS EM LABORATÓRIO	98
FIGURA 58 - IMPRESSORA 3D CREALITY CR-10S	100
FIGURA 59 - BALANÇA DE PRECISÃO	101
FIGURA 60 - PAQUÍMETRO E TRANSFERIDOR	102
FIGURA 61 - MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAIO DE TRAÇÃO OSWALDO FILIZOLA AME-2kN.	103
FIGURA 62 - MICROSCÓPIO OLYMPUS BX51.....	104
FIGURA 63 - FILAMENTO DE PLA REFORÇADO COM 15% DE FIBRA DE CARBONO	106
FIGURA 64 - DIMENSÕES FINAIS DO CORPO DE PROVA TIPO III	107
FIGURA 65 - MODELO CORPO DE PROVA EM 3D NO SOLIDWORKS	107
FIGURA 66 - PREENCHIMENTO TIPO CÚBICO	108
FIGURA 67 - - PREENCHIMENTO TIPO OCTETO	109
FIGURA 68 - PREENCHIMENTO TIPO GIRÓIDE	109
FIGURA 69 - ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO	110

FIGURA 70 - IMPRESSORA 3D CREALITY EM FUNCIONAMENTO	112
FIGURA 71 - CORPOS FINALIZADOS NA IMPRESSORA 3D	113
FIGURA 72 – MICROSCOPIA EXTERNA DO FILAMENTO.....	118
FIGURA 73 – MICROSCOPIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO FILAMENTO	119
FIGURA 74 – CORPO DE PROVA OCTETO COM 25% DE DENSIDADE DE PREENCHIMENTO.....	121
FIGURA 75 – CORPO DE PROVA CÚBICO COM 50% DE DENSIDADE DE PREENCHIMENTO.....	121
FIGURA 76 – CORPO DE PROVA GIRÓIDE COM 75% DE DENSIDADE DE PREENCHIMENTO.....	122
FIGURA 77 - DENSIDADES DE PREENCHIMENTO EM RELAÇÃO AO VOLUME TOTAL.....	128
FIGURA 78 – ILUSTRAÇÃO DA PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO INTERNO E PERÍMETRO NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM CORPO DE PROVA....	135
FIGURA 79 – FOTOGRAFIA DOS 27 CORPOS DE PROVA APÓS RUPTURA....	138
FIGURA 80 - MICROGRAFIA DA REGIÃO DE ROMPIMENTO DO CORPO DE PROVA OCTETO 75%.....	139
FIGURA 81 - TRINCAS NO FILAMENTO EXTERNO DA CASCA DO CORPO DE PROVA OCTETO 75%.....	140
FIGURA 82 - FIBRAS DE CARBONO EXPOSTAS NO LOCAL DE ROMPIMENTO	141
FIGURA 83 - ROMPIMENTO DÚCTIL DOS FILAMENTOS INTERNOS	142
FIGURA 84 - MICROGRAFIA DOS TIPOS DE PREPREENCHIMENTO NA SEÇÃO TRANSVERSAL ROMPIDA	143
FIGURA 85 - DISSIPAÇÃO DE FORÇAS NOS FILAMENTOS DO PREENCHIMENTO INTERNO	144
FIGURA 86 - TRINCAS NO PERÍMETRO DO CORPO DE PROVA OCTETO COM 50% DE DENSIDADE	145

FIGURA 87 – MODELO PROPOSTO DE ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA GIRÓIDE COM PREENCHIMENTO 50% E 75%.....	146
---	-----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - REFORÇO DO PLA, DETALHAMENTO DE AMOSTRAS	91
TABELA 2 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ANOVA.....	92
TABELA 3 - EXPERIMENTOS NOS CORPOS DE PROVA	94
TABELA 4 - CONCENTRAÇÕES DE FIBRA DE CARBONO	96
TABELA 5 - DADOS TÉCNICOS DA IMPRESSORA 3D	100
TABELA 6 - DADOS TÉCNICOS MÁQUINA DE ENSAIO	103
TABELA 7 - PARÂMETROS PARA IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	111
TABELA 8 – MÉTODO DE ASSOCIAÇÃO DAS CURVAS DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO	116

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - ENSAIOS DE TRAÇÃO- TENSÃO x DEFORMAÇÃO CONFORME ASTM D638.....	81
GRÁFICO 2 - COMPORTAMENTO DE POLÍMEROS EM TRAÇÃO	83
GRÁFICO 3 - COMPORTAMENTO DÚCTIL/FRÁGIL VARIÁVEL	84
GRÁFICO 4 - ENSAIOS DE TRAÇÃO	97
GRÁFICO 5 – VARIAÇÃO E TEMPO MÉDIO DE IMPRESSÃO.....	120
GRÁFICO 6 – TEMPERATURA MÉDIA AMBIENTE DURANTE A FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	123
GRÁFICO 7 – ÁREA MÉDIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL ESTREITA DOS CORPOS DE PROVA.....	124
GRÁFICO 8 - MEDIDAS TEÓRICAS E REAIS DAS DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA.....	125
GRÁFICO 9 - VARIAÇÃO E MÉDIA DA MASSA DOS CORPOS DE PROVA.....	127
GRÁFICO 10 - COMPARATIVO DOS PREENCHIMENTOS COM 25% DE DENSIDADE	130
GRÁFICO 11 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS PREENCHIMENTOS COM 50% DE DENSIDADE	131
GRÁFICO 12 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS PREENCHIMENTOS COM 75% DE DENSIDADE	132
GRÁFICO 13 - RESULTADOS NUMÉRICOS DA COMPARAÇÃO DA TENACIDADE ENTRE AS AMOSTRAS DE 25%, 50% E 75% DE PREENCHIMENTO	134
GRÁFICO 14 – COMPARAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DA CASCA E DO PREENCHIMENTO PARA A SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA	136
GRÁFICO 15 - TENSÃO MÁXIMA ESPECÍFICA DOS CORPOS DE PROVA	137
GRÁFICO 16 - TENACIDADE ESPECÍFICA DOS CORPOS DE PROVA.....	138

LISTA DE SIGLAS

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CAD – *Computer Aided Design*

CT – *Computerized Tomography*

FDM - *Fused Deposition Modeling*

FFF – *Fused Filament Fabrication*

G-code - *Geometric code*

GIMA - Grupo de Inteligência aplicado a Manufatura

MA - Manufatura Aditiva

STL - *Standard Tecelation Language*

SL - Estereolitografia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 JUSTIFICATIVA	21
1.2 OBJETIVOS	23
1.3 DELIMITAÇÃO DO ESCOPO	23
2. REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1 MANUFATURA ADITIVA.....	25
2.1.1 Modelagem de Deposição Fundida (FDM).....	26
2.1.2 Escrita Direta com Tinta (DIW).....	27
2.1.3 Fotocura SLA e DLP	28
2.1.4 Laminação (LOM).....	29
2.1.5 Sinterização seletiva a laser (SLS).....	30
2.1.6 Jateamento de Fotopolímero.....	31
2.1.7 Jateamento de Aglutinante (3DP)	31
2.2 MANUFATURA ADITIVA - FDM.....	32
2.2.1 Funcionamento da Impressora FDM	34
2.2.2 Adesão entre filamentos.....	36
2.2.3 Impressão de material de suporte	38
2.2.4 Plataforma de impressão.....	39
2.2.5 Impressoras de sistema aberto e sistema proprietário.....	41
2.2.6 Preparação do Arquivo para Impressão	42
2.2.7 Parâmetros de Processo	47
2.2.7.1 Densidade ou porcentagem de preenchimento.....	47
2.2.7.2 Tipo de preenchimento.....	49
2.2.7.3 Orientação da impressão	53
2.2.7.4 Espessura da camada.....	54
2.2.8 Parâmetros de Impressão	56
2.2.8.1 Temperatura de extrusão	56
2.2.8.2 Ângulo de varredura	58

2.2.8.3 Temperatura da plataforma de impressão.....	59
2.2.8.4 Velocidade de impressão	60
2.2.8.5 Casca do modelo.....	61
2.2.9 Defeitos de impressão comuns em impressoras FDM	62
2.2.9.1 Empenamento	62
2.2.9.2 Delaminação	63
2.2.9.3 Deslocamento das camadas	65
2.2.9.4 Teias no preenchimento interno	66
2.2.9.5 Superaquecimento e colapso	68
2.2.9.6 Ressalto nas bordas da base	69
2.2.9.7 Ondulações	71
2.2.9.8 Extrusão excessiva.....	72
2.2.10. Limitações das peças impressas por FDM.....	73
2.3 MATERIAIS UTILIZADOS PARA IMPRESSAO FDM	73
2.3.2 Ácido Polilático (PLA).....	76
2.3.3 PLA com fibra de carbono.	78
2.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE PEÇAS POLIMÉRICAS FDM	80
2.4.1 Resistência à tração dos polímeros	81
2.4.2 Ensaio de tração	85
2.4.3 Tenacidade.....	88
2.5 TRABALHOS CORRELATOS.....	89
2.5.1 “ <i>Effect of fused deposition modelling (FDM) process parameters on tensile strength of carbon fibre PLA</i> ”.....	90
2.5.2 “ <i>Considerations on the Applicability of Test Methods for Mechanical Characterization of Materials Manufactured by FDM.</i> ”	92
2.5.3 “ <i>Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties.</i> ”	95
3. MATERIAIS E MÉTODOS	98

3.1 MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO	99
3.1.1 Impressora 3D - Creality CR-10S	99
3.1.2 Balança de Precisão	101
3.1.3 Paquímetro	102
3.1.4 Máquina Universal para Ensaio de Tração	102
3.1.5 Microscópio Óptico	104
3.1.6 Softwares Utilizados	105
3.1.7 Material	105
3.2 METODO E DESENVOLVIMENTO	106
3.2.1 Modelagem e Fabricação dos Corpos de Prova	106
3.3 ENSAIOS DE TRAÇÃO	113
3.4 Composição da curva média Tensão x Deformação dos grupos de amostras ..	115
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	118
4.1 ANÁLISE DO FILAMENTO	118
4.2 DADOS DA IMPRESSÃO	119
4.2.1 Tempos de impressão	119
4.2.2 Temperatura ambiente de impressão	122
4.3 ANÁLISE FÍSICA DOS CORPOS DE PROVA	123
4.3.1 Seção transversal e medidas externas	124
4.3.2 Massa dos corpos de prova	126
4.4 RESULTADO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO	129
4.4.2 Comparação entre tipos de preenchimentos com a mesma densidade	129
4.4.3 Tenacidade	133
4.4.4 Influência da casca na seção transversal	134
4.4.5 Tensão e Tenacidade específica	136
4.5 MICROGRAFIA DA REGIÃO DE ROMPIMENTO	138
4.6 PROPOSTA DE MODELO DE ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA	143
5. CONCLUSÕES FINAIS	148
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	149

REFERÊNCIAS.....151

ANEXOS156

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da globalização, a necessidade de se ter escalabilidade e agilidade nos processos produtivos aumentou, e uma nova ferramenta vem sendo usada para auxiliar nesta finalidade, a impressão 3D.

A impressão 3D, ou manufatura aditiva, está provocando uma mudança na forma como os produtos são projetados, fabricados e distribuídos aos usuários finais. E, nesse setor, a manufatura aditiva FDM é a mais difundida, pelo baixo custo do equipamento e facilidade na aquisição de materiais de consumo e boa exatidão das peças finais (HÜSEYİN KÜRŞAD et al., 2017).

Na década de 1980 foi apresentado por Charles Hull um novo processo de fabricação baseado na adição sucessiva de material em forma de camadas conhecido atualmente como impressão 3D ou manufatura aditiva, e essa técnica para fabricação de peças foi denominada estereolitografia (SL), também conhecida por SLA *stereolithography apparatus* (HULL; ARCADIA 1986).

Desenvolvimentos recentes reduziram o custo de impressoras 3D, expandindo assim, suas aplicações em: escolas, residências e laboratórios (NGO et al., 2018). Segundo a Sulavik; Waller (2016), as impressoras 3D estão ajudando a impulsionar a transição da produção em massa para a personalização em vários setores da indústria. Isto deve-se ao fato que esta tecnologia se apresenta como uma solução para fabricação de pequenos lotes de produtos complexos, com alto grau de personalização, mesmo em ambientes de produção em larga escala.

A impressão 3D possibilita a fabricação de uma ampla variedade de estruturas e geometrias complexas a partir de dados de modelos tridimensionais. Com comandos obtidos diretamente de um sistema computacional, com base na representação geométrica 3D do componente, o material é depositado completando camadas horizontais sobrepostas até a conclusão do objeto (VOLPATO, 2017). Assim, tem-se o conceito de produção por adição de material em contraste à produção por métodos convencionais, em que a peça final é obtida através da remoção de material, como na usinagem (RODRIGUES et al., 2017).

A Fabricação por filamento fundido (FFF) mais comumente conhecida modelagem por deposição de material fundido (FDM), consiste no uso de filamentos poliméricos fundidos para a composição das camadas. A camada recém depositada

é solidificada e se adere às camadas depositadas anteriormente através da adesão por difusão entre camadas. A repetição deste processo eventualmente resulta em peça com qualquer geometria complexa (GARG A. et al., 2017).

A seleção do material em conjunto com os parâmetros de processo são fundamentais para obtenção de peças com qualidade estética, dimensional e atendimento a especificações mecânicas do projeto. Peças impressas em 3D são consideradas como estruturas compósitas laminadas por terem camadas fundidas empilhadas verticalmente, e isso resulta nas propriedades anisotrópicas desse material. Devido a isso, as propriedades mecânicas de peças FDM são dependentes não só na qualidade do filamento empregado, como também nos parâmetros de impressão (LOVO et al., 2017).

Na fabricação de peças pela impressão 3D, o volume do objeto e consequente tempo e material utilizado, são fatores a serem levados em conta no projeto (DOMÍNGUEZ et al., 2020). Uma vantagem desse método é a possibilidade de efetuar um preenchimento parcial da peça. Essa técnica é utilizada para diminuir densidade interna da peça, reduzindo o tempo e materiais utilizados na sua fabricação (FERNANDEZ VICENTE, et al., 2016). Na prática isso significa que apenas parte do volume interno da peça contém material e isso é alcançado através do espaçamento dos filamentos depositados (KIENDL 2019).

Visando caracterizar os tipos de preenchimento e sua influência sob as propriedades mecânicas da peça final, foram utilizados filamentos de *PLA* reforçados com fibra de carbono, que é uma variação do filamento normal de *PLA*. Esse material foi escolhido pelas vantagens que oferece sob tração, visto que é esse o esforço sendo estudado. A alta resistência à tração que as fibras possuem aumentam a resistência do filamento, e consequentemente da peça final, para fabricações com os mesmos parâmetros de processo (HÜSEYİN KÜRŞAD et al., 2019) (PERTUZ et al., 2020). Neste trabalho foram caracterizados mecanicamente 3 tipos de preenchimento, cada um em 3 porcentagens de preenchimento distintas.

1.1 JUSTIFICATIVA

A tecnologia da manufatura aditiva está conquistando espaço no mundo da fabricação e é cada vez mais comum o uso das impressoras 3D, utilizando diversos tipos de materiais. Para alguns fabricantes pode ser vantajoso trocar antigos maquinários por impressoras 3D, por exemplo uma fabricante de peças de alumínio de reposição para aeronaves, ou uma fabricante de peças complexas injetadas de baixo volume.

Segundo uma pesquisa realizada pela Sculpteo (2018), cerca de 90% dos usuários de impressoras 3D veem na impressão uma vantagem competitiva em relação ao mercado. No setor de veículos automotores, por exemplo, a manufatura aditiva permite que as peças sejam produzidas com qualidade, rapidez e “*ready to use*”, ou seja, as peças são fabricadas e vão diretamente para a montagem final.

O uso da técnica de FDM como um método de produção está em crescimento, porém um dos maiores desafios na fabricação de peças FDM para aplicação final está em prever as propriedades mecânicas das peças devido à natureza descontínua do processo (COOGAN e KAZMER, 2017).

A compreensão da resistência de materiais anisotrópicos é complexa, e isso é um desafio na manufatura aditiva por FDM. O avanço na caracterização dos comportamentos dessas peças é crítico para o aumento do seu uso em situações com demanda estrutural. Os principais valores que a engenharia de resistência dos materiais necessita saber na execução de um projeto são a tensão de escoamento, tensão máxima, alongamento máximo e módulo de elasticidade (LIU et al., 1995). E esses foram os resultados analisados neste trabalho. A compreensão desses valores em peças poliméricas impressas em 3D, é o principal desafio que motivou esse trabalho.

Os procedimentos estudados e propostos nesse trabalho, auxiliarão projetistas e engenheiros a usarem com maior confiabilidade peças impressas em 3D com a tecnologia *FDM* para aplicações industriais. A escolha do PLA reforçado com fibra de carbono também é de grande relevância científica e industrial, pois esse material oferece excelentes propriedades mecânicas comparado a sua contraparte pura sem a adição de fibras.

Durante o levantamento bibliográfico deste trabalho, foi detectado um segmento com poucos trabalhos científicos, que é a caracterização mecânica em tração para materiais compósitos. Assim, este trabalho se mostra promissor para atender a expectativa de projetistas e abre uma janela de oportunidades para novas pesquisas.

1.2 OBJETIVOS

Neste item descreve-se o objetivo geral e os objetivos específicos que direcionaram a pesquisa.

O objetivo geral desta pesquisa foi:

- Avaliar o efeito do tipo de preenchimento em peças impressas em 3D por *FDM* utilizando filamento compósito de *PLA* reforçado com fibra de carbono, em relação as suas propriedades mecânicas sob tração.

E os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinar por meio da revisão da literatura o melhor conjunto de parâmetros para fabricação dos corpos de prova, como altura de camada, velocidade de impressão, temperatura de extrusão etc;
- Fabricar corpos de prova de acordo com a norma ASTM D638-14, com diferentes tipos de preenchimento e porcentagem de densidade, utilizando uma impressora FDM.
- Efetuar ensaios de tração nos corpos de prova fabricados;
- Caracterizar as propriedades mecânicas para cada tipo e densidade de preenchimento.
- Propor um modelo de rompimento para as amostras ensaiadas.

1.3 DELIMITAÇÃO DO ESCOPO

O estudo será específico para o *PLA* com 15% de fibra de carbono, pois de acordo com o levantamento bibliográfico essa concentração é o equilíbrio ideal entre reforçar o filamento e permitir uma boa adesão entre os mesmos (HÜSEYİN KÜRŞAD et al., 2019).

Este trabalho se limita a estudar peças fabricadas para operar em temperatura ambiente, assim os ensaios não terão controle de temperatura, sendo executado à temperatura ambiente que será registrado nos resultados. Tanto para a fabricação como para os ensaios e análises, não será feito o controle de umidade do local, sendo esse, da mesma maneira, registrado conforme situação climática do momento.

Não foi avaliado o quesito de viabilidade financeira da produção em larga escala, nem despesas relacionadas ao tempo de fabricação e *setup*.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo encontra-se a revisão da literatura, sobre os temas desenvolvidos. Busca-se situar o trabalho e verificar o estado da arte do processo sendo pesquisado, de modo a tomar todas as medidas necessárias para garantir a confiabilidade, utilidade, originalidade dos experimentos e caracterização mecânica proposta.

2.1 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva (MA) ou impressão 3D é a denominação de um processo que se inicia com um modelo digital tridimensional do objeto que se deseja e termina com a obtenção física desse modelo. Desde a sua criação, esse processo vem evoluindo e sendo incluído em uma grande variedade de processos produtivos.

A manufatura aditiva foi inicialmente desenvolvida em 1986 por Charles Hull, com a invenção e desenvolvimento do método da estereolitografia, que é um processo que utiliza um laser para solidificar as camadas de um polímero líquido fotossensível (THOMAS; GILBERT, 2014). Essa se tornou a primeira tecnologia de MA a ser comercializada (BOGUE, 2013). Devido a capacidade de prototipagem rápida e econômica, a tecnologia de impressão 3D, foi inicialmente utilizada por arquitetos, designers e engenheiros para a fabricação de maquetes e protótipos (NGO et al., 2018).

A MA foi a tecnologia pioneira no processo de criação de modelos de prototipagem rápida conseguindo produzir objetos 3D sem a subtração de material (BERMAN; ZARB; HALL, 2012). Atualmente, a tecnologia do processo FDM é popular, de código aberto e com uma grande diversidade de impressoras 3D comerciais de tamanhos compactos disponíveis para aquisição com preços acessíveis, baixos custos de manutenção e de matéria prima (SONG; TELENKO, 2017).

A tecnologia de MA oferece uma grande variedade de materiais a serem utilizados como matéria prima, como polímeros de alto desempenho, cerâmica, vidro, concreto, aço, alumínio, alimentos, biomateriais e entre outros (WONG; HERNANDEZ, 2012) (NGO et al., 2018). A MA atualmente é capaz de produzir uma

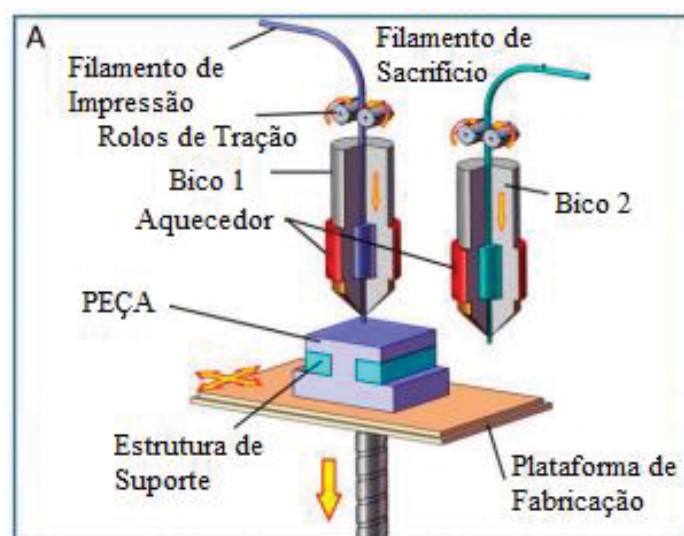
grande diversidade de peças e múltiplas aplicações, já são encontradas aplicações na indústria aeroespacial, automotiva, odontológica, médica, de brinquedos, de moda e acessórios, artística, de arquitetura (BAHNINI et al., 2018), alimentícia (LIPTON et al., 2015) e de construção civil (NGO et al., 2018).

2.1.1 Modelagem de Deposição Fundida (FDM)

O princípio de funcionamento das impressoras FDM envolve a fusão e extrusão de um filamento termoplástico através de um bico. O material derretido é depositado na plataforma de fabricação, em seguida, esfria e solidifica. Esse processo é repetido camada por camada, para criar uma estrutura 3D.

Materiais termoplásticos como: poliamida (PA), ácido polilático (PLA), acrilonitrila butadieno-estireno (ABS) e policarbonato (PC) são os mais empregados como matéria prima para impressoras 3D FDM. Esse tipo de impressora tem sido amplamente utilizado por seu baixo custo de material e natureza de código aberto, mas têm limitações por sua baixa resolução de impressão, lenta velocidade de impressão e relativa fraqueza das peças finais. A representação esquemática do equipamento FDM é apresentada na FIGURA 1.

FIGURA 1 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE IMPRESSORAS FDM



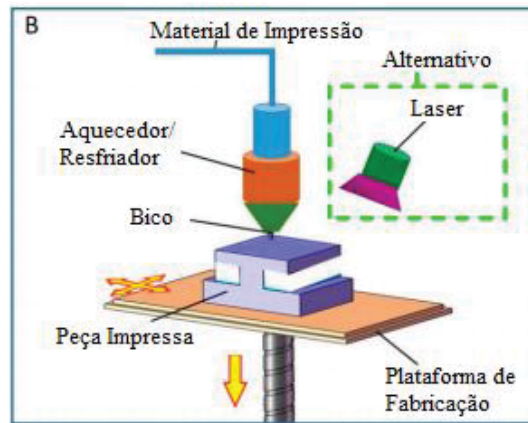
FONTE: Adaptado: Yuanyuan, (2017).

Como essa técnica de impressão 3D é a utilizada nesse trabalho, iremos detalhar mais à frente o seu funcionamento.

2.1.2 Escrita Direta com Tinta (DIW)

As impressoras de escrita direta com tinta usam bicos para extrudar o material na plataforma de fabricação (FIGURA 2). Esta tecnologia permite a deposição controlada de materiais em um líquido altamente viscoso, o que lhes permite manter a sua forma após a deposição. Esse sistema pode depositar uma variedade de materiais como cerâmica, plásticos, alimentos, hidrogéis e até células vivas. O tamanho do bico, a viscosidade e a densidade do material, velocidade de deposição e outros parâmetros podem ser ajustados para otimizar a qualidade de deposição (YUANYUAN et al., 2017).

FIGURA 2 - ESCRITA DIRETA COM TINTA



FONTE: Adaptado: Yuanyuan, (2017).

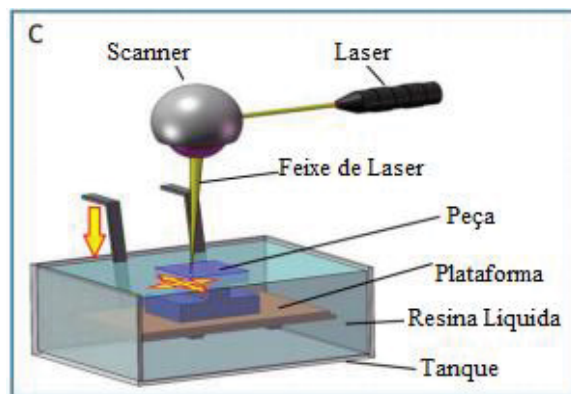
Pode ser necessário um processo de pós-fabricação para reforçar o objeto, melhorando suas propriedades mecânicas através de sinterização, aquecimento e cura por luz ultravioleta (UV) (YUANYUAN et al., 2017).

2.1.3 Foto cura SLA e DLP

A foto cura usa luz ultravioleta (UV) para curar polímeros líquidos camada a camada, construindo estruturas 3D na plataforma. Existem dois tipos de tecnologias de foto cura: aparelho de estereolitografia (SLA) e o processamento digital de luz (DLP).

A FIGURA 3 mostra o princípio fundamental do SLA. Neste processo, um tanque preenchido com resina líquida fotossensível, que muda de líquida para sólida quando exposta a um determinado comprimento de onda. A camada curada com o laser é coberta com uma nova camada de resina líquida depois que a plataforma reduz a altura de uma camada no eixo Z. Em seguida, uma nova camada está pronta para ser desenhada. As etapas acima são repetidas até que todas as partes do modelo digital sejam concluídas, e um modelo 3D é obtido.

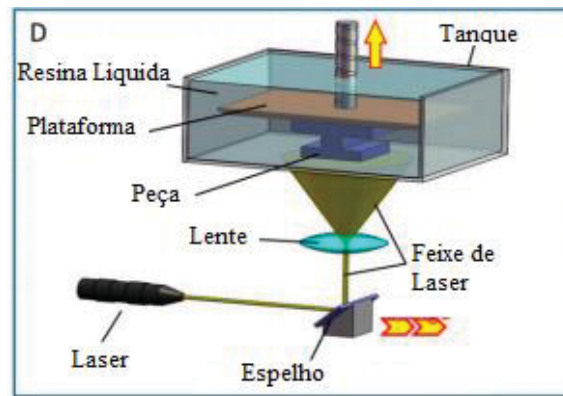
FIGURA 3 - PRINCÍPIO FUNDAMENTAL DO SLA



FONTE: Adaptado: Yuanyuan, (2017).

O DLP usa uma lâmpada laser ou UV como fonte de luz. A luz brilha através de padrões especiais em um espelho digital, as partes expostas são curadas e uma camada é finalizada. A plataforma sobe uma altura de uma camada e o próximo período de exposição começa. Um modelo sólido 3D é obtido quando todas as camadas foram expostas à luz. A FIGURA 4 mostra o princípio fundamental do DLP. O dispositivo espelho usado como máscara dinâmica é a principal diferença entre SLA e DLP (CHOI et al., 2009).

FIGURA 4 - PRINCÍPIO FUNDAMENTAL DO DLP



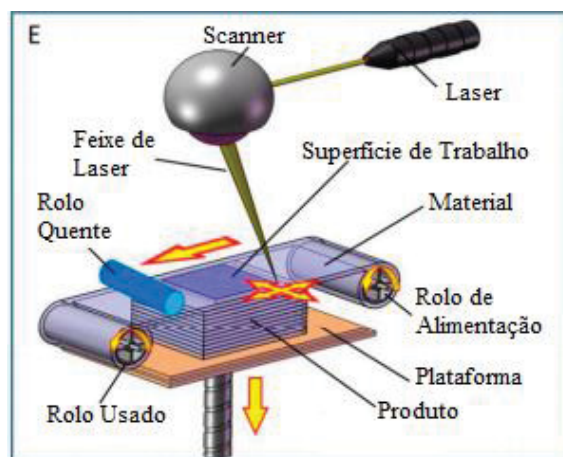
FONTE: Adaptado: Yuanyuan, (2017).

SLA e DLP podem produzir estruturas altamente precisas com recursos internos complexos, mas têm a desvantagem de serem limitado ao uso de um único material (CHOI et al., 2009).

2.1.4 Laminação (LOM)

A fabricação de objetos laminados (LOM) usa lasers ou facas para cortar materiais em folha. A FIGURA 5 mostra a base de funcionamento da LOM

FIGURA 5 - FUNCIONAMENTO DA TECNOLOGIA LOM



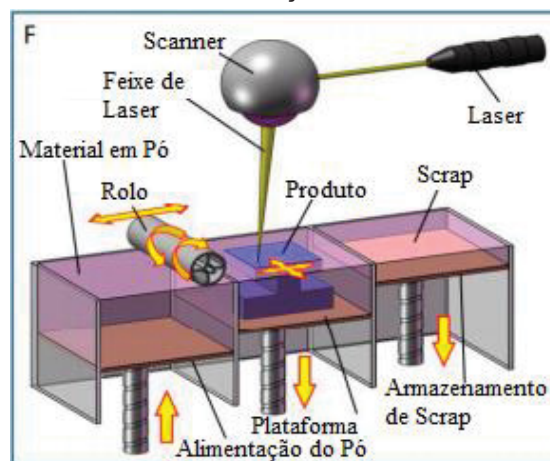
FONTE: Adaptado: Yuanyuan, (2017).

Quando uma camada é cortada, outra folha é adicionada. A nova camada pode ser firmemente aderida às peças concluídas por um rolo que compacta e aquece, colando as folhas. Os passos acima são repetidos até que o processo está concluído. Finalmente, um modelo sólido 3D é finalizado após a remoção das seções inúteis (DUTTA et al., 2001).

2.1.5 Sinterização seletiva a laser (SLS)

Sinterização seletiva a laser (SLS), usa materiais em pó como plásticos, metais, cerâmicas e ceras. O princípio de seu funcionamento consiste na deposição de uma camada de pó sobre uma bancada e o uso de um laser de alta potência para sinterizar o material. Após a sinterização da camada, a plataforma de fabricação é abaixada e uma nova camada de pó é colocado em cima da camada anterior, preparando para um novo ciclo, conforme mostrado na FIGURA 6 (DECKARD et al., 1989).

FIGURA 6 - SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER



FONTE: Adaptado: Yuanyuan, (2017).

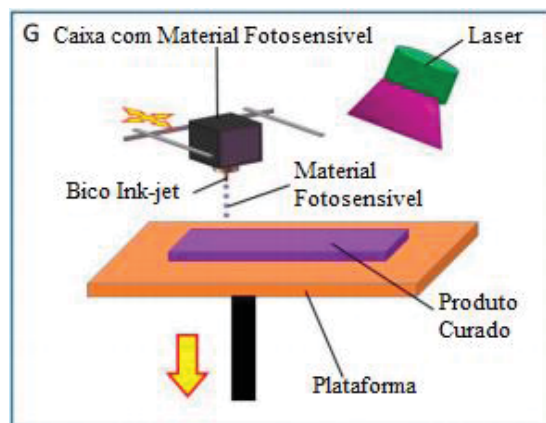
A tecnologia SLA pode imprimir peças com resistência e densidade altas o bastante para atender aos padrões aeroespaciais ou militares (DECKARD et al.,

1989).

2.1.6 Jateamento de Foto polímero

O jateamento de foto polímero foi originalmente introduzido por Gothait em 1999, um método chamado Polyjet, patenteado pela empresa Objet que se fundiu com a Stratasys em 2012. Para o Polyjet, uma resina fotossensível é usada como material de impressão. Esta resina fotossensível é ejetada de um bico de jato de tinta e depositado em uma plataforma móvel, curado pela luz UV e solidificado (FIGURA 7). Esta abordagem permite a fabricação camada por camada. Um produto 3D pode ser obtido após a cura de todas as camadas de todo o modelo (GOTHAIT 2001).

FIGURA 7 - JATEAMENTO DE FOTOPOLÍMERO



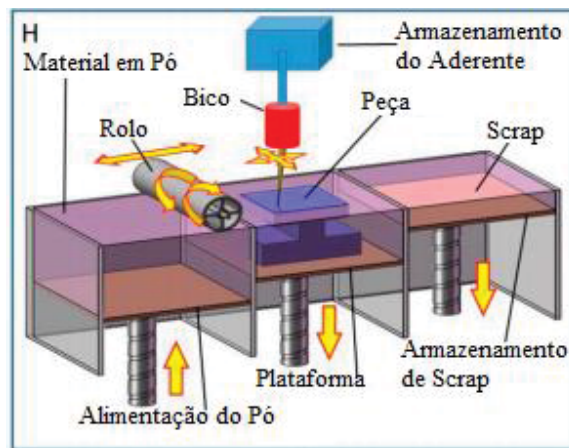
FONTE: Adaptado: Yuanyuan, (2017).

Este método pode imprimir produtos com vários materiais e cores simultaneamente. Polyjet é adequado para imprimir objetos pequenos e delicados devido à sua alta resolução. A força das peças produzidas por esse processo é, no entanto, fraca (GOTHAIT 2001).

2.1.7 Jateamento de Aglutinante (3DP)

Nesta técnica, adesivos especiais são ejetados de um bico de jato de tinta e depositados em camadas de pó. Este processo liga a camada de materiais em pó e produz uma estrutura sólida. Quando repetida, uma estrutura 3D pode ser construída camada por camada na plataforma de impressão, ver FIGURA 8. Esta abordagem não precisa de estruturas de suporte, pois os pó podem se sustentar. As impressoras 3DP podem trabalhar com uma variedade de materiais em pó, como cerâmica, gesso e até mesmo açúcar (YUANYUAN et al., 2017).

FIGURA 8 - JATEAMENTO DE AGLUTINANTE



FONTE: Adaptado: Yuanyuan, (2017).

Esta tecnologia pode imprimir vários materiais, mas a resistência e a rugosidade da superfície dos objetos não são boas (YUANYUAN et al., 2017).

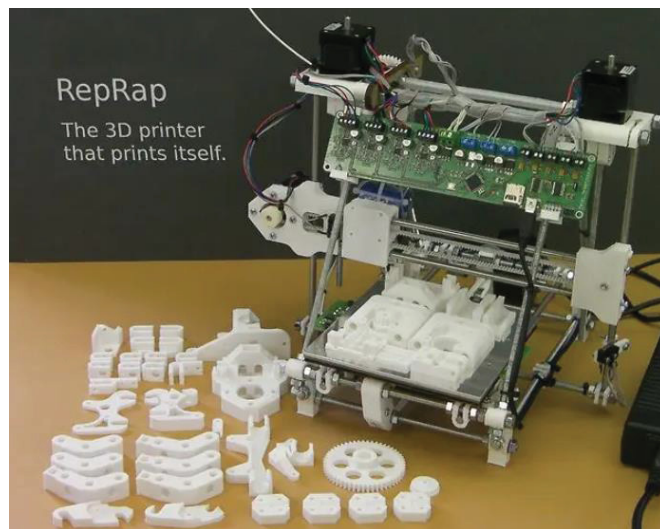
2.2 MANUFATURA ADITIVA - FDM

Modelagem por deposição de material fundido, ou simplesmente FDM, foi patenteada por Crump em 1988, que mais tarde fundou a Stratasys Corporation (STRATASYS 2017). FDM é um processo de MA de extrusão por fusão onde a matéria-prima termoplástica em forma de filamento é fundida e extrudada. Através de um bico móvel que deposita o material sob uma plataforma de fabricação em camadas sucessivas e sobrepostas até a formação da peça final.

Por muito tempo após a sua concepção a manufatura aditiva esteve ausente na indústria, devido ao alto custo da tecnologia, matéria prima e maquinário. Adicionalmente esse processo era resguardado por diversas patentes e assim somente grandes empresas ou centros de pesquisa possuíam esse equipamento. Essa realidade sofreu mudanças a partir de 2009 com o vencimento da patente de alguns processos da tecnologia de impressão 3D por FDM. Inclusive o próprio termo “FDM” havia sido patenteado pela empresa Stratasys e até 2009 processos que se assemelhavam a esse, eram denominados FFF ou Fabricação por Filamento Fundido (STRATASYS 2021).

Nessa época, em um ambiente, universitário surgiu um movimento de colaboração aberta chamado *RepRap*, que desenvolveu impressoras 3D de baixo custo. Vários componentes dessas impressoras foram projetados para serem fabricados por outras impressoras semelhantes (FIGURA 9), possibilitando a fabricação de uma segunda impressora com facilidade (RHYS et al., 2011).

FIGURA 9 - IMPRESSORA 3D ESTILO REPRAP

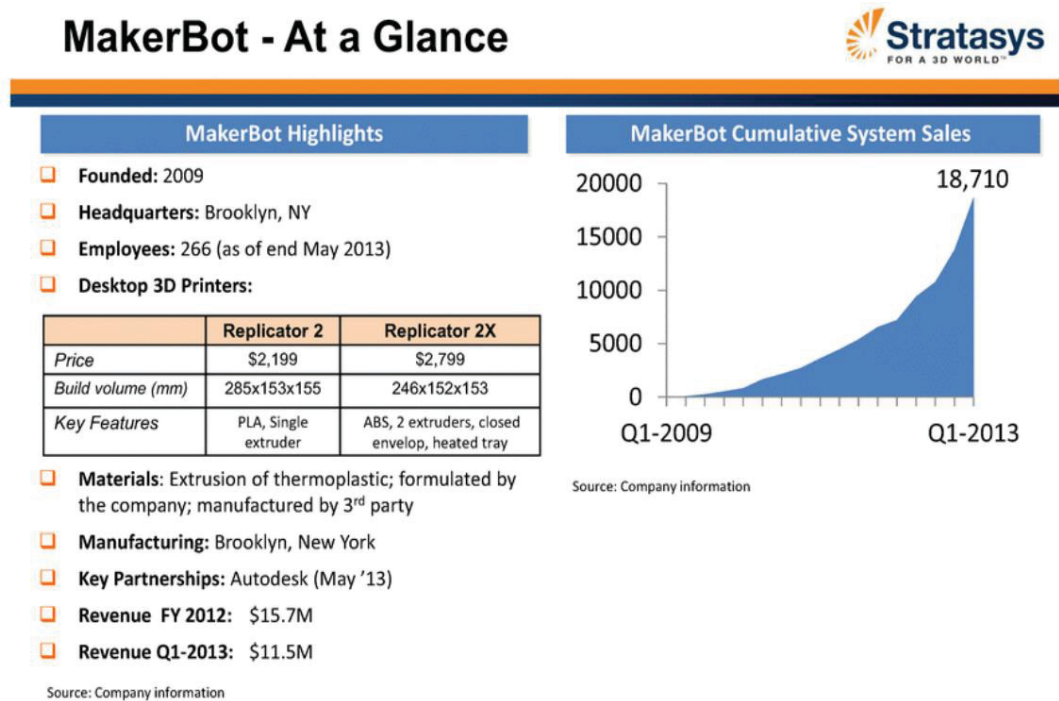


Fonte: RepRap, (2021).

Em 2012 uma empresa chamada MakerBot, fabricou as primeiras impressoras 3D comerciais de pequeno porte, a Replicator 2 e Replicator 2X, que eram vendidas parcialmente montadas, calibradas e que com facilidade ficava pronta para uso, com o preço inicial de apenas U\$2199 (STRATASYS 2021). Na FIGURA 10 podemos

observar alguns gráficos com dados da Stratasys indicando um crescimento exponencial nas vendas da impressora Replicator, assim como os preços e o tamanho da plataforma de impressão de cada uma delas.

FIGURA 10 - DADOS DOS RESULTADOS DA EMPRESA STRATASYS



Fonte: Stratasys, (2021).

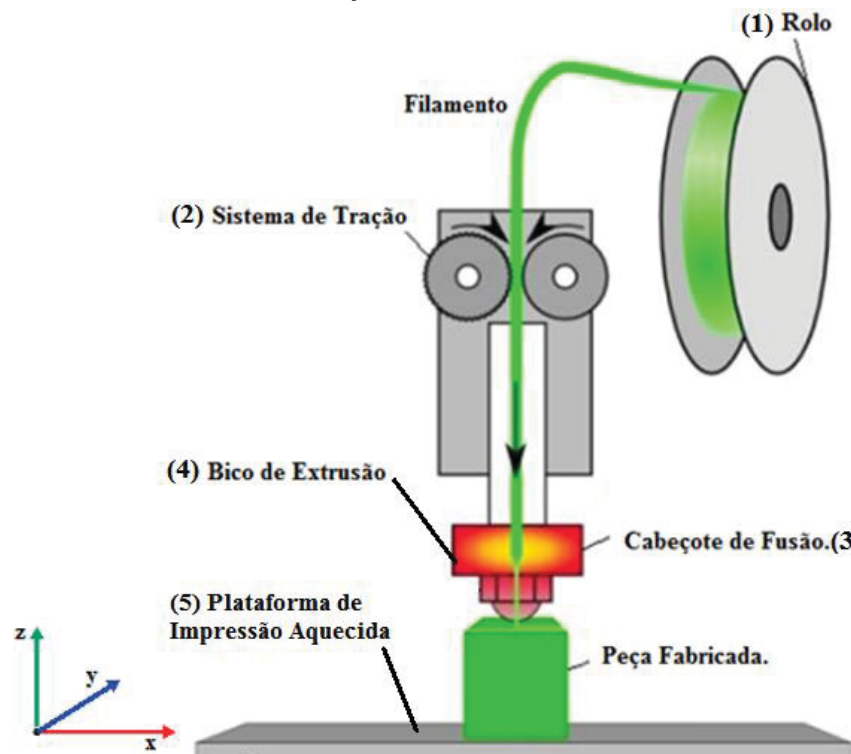
A empresa fundada em 2009, em *New York*, atingiu a venda de mais de 18 mil impressoras por ano em 2013. O sucesso desse lançamento a empresa se tornou referência em impressoras 3D de baixo custo de aquisição e operação (SULAVIK; WALLER, 2016).

2.2.1 Funcionamento da Impressora FDM

O funcionamento detalhado de uma impressora 3D do tipo FDM é apresentado na FIGURA 11. Os componentes consistem em um rolo (1) que serve para o armazenamento do filamento cilíndrico que é utilizado na impressora, um sistema de tracionamento do filamento por engrenagens (2), por um cabeçote aquecido para a

fusão do filamento (3), por um bico de extrusão (4), por um sistema de deslocamento em 3 eixos e pela plataforma de impressão (5).

FIGURA 11 - REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO DE IMPRESSÃO POR FDM



FONTE: Adaptado, COESUM 3D, (2020).

O filamento alimentado por um dispositivo de engrenagens controlado por um motor elétrico produz o fluxo da velocidade de extrusão. E o cabeçote que possui um canal aquecido derrete o filamento que é forçado através de um bico em formato de funil que estabelece a extrusão na espessura e viscosidade final. Esse cabeçote então é movimentado sobre uma plataforma por meio de motores de passo nos eixos X e Y (largura e comprimento) de acordo com um código específico. O filamento derretido é então forçado através do cabeçote aquecido em direção ao bico, este que deposita o material ao longo do plano XY na plataforma de fabricação. Após a finalização de uma camada a plataforma desce ou a cabeça de impressão se move para cima ao longo da direção Z em exatamente uma espessura da camada, para dar início à camada seguinte. Assim, o objeto tridimensional é criado em uma rotina camada por camada. Este processo continua até que a peça seja construída.

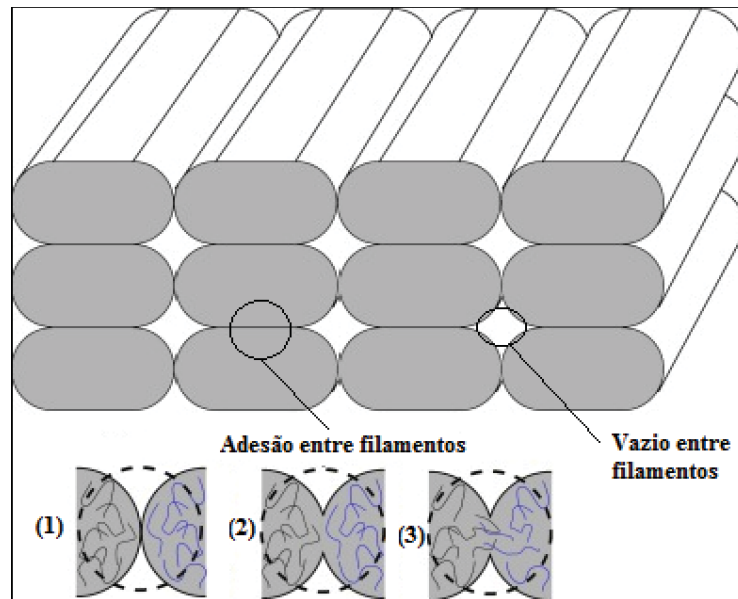
Após a finalização da impressão é necessário aguardar o resfriamento da plataforma para fazer o descolamento da peça. A temperatura da plataforma de impressão gera um importante gradiente de temperatura na peça a ser fabricada. Se esse parâmetro não for corretamente avaliado, pode aquecer demasiadamente, deformando a peça sendo impressa ou não aquecer o bastante gerando defeitos na adesão entre camadas (POPESCU et al., 201).

2.2.2 Adesão entre filamentos

No processo de impressão por FDM, material é depositado inicialmente ao longo da borda e depois na região interna do contorno. Uma quantidade específica de contornos é necessária para formar a peça, tanto esse parâmetro como o de densidade interna devem ser determinados de acordo com os requisitos funcionais e estéticos da peça (TURNER et al., 2014).

A qualidade da fusão entre camadas no processo FDM depende de tempo gasto para solidificação do material. Os filamentos recém depositados interagem com a camada depositada anteriormente, enquanto ela está em estado de difusão e isso cria uma união entre elas. Por isso é importante considerar a temperatura ambiente e da mesa de fabricação. O esfriamento muito rápido do filamento depositado pode ocasionar a solidificação antes da difusão com a camada anterior, isso gera falhas estruturais na peça. Assim, são criados laços que não tem as propriedades mecânicas esperadas (CHACÓN et al., 2017). Na FIGURA 12 é demonstrado três situações possíveis de difusão:

FIGURA 12 - POSSÍVEIS SITUAÇÕES DE ADESÃO



Fonte: Adaptado HERNANDEZ et al., (2020).

-Item (1). Nenhuma adesão: Não houve difusão entre essas camadas, e isso pode gerar um defeito estrutural futuramente na peça. Para peças com demanda estrutural é necessário avaliar o gradiente de temperatura advindo da plataforma aquecida assim como considerar a impressão 3D em um gabinete fechado com temperatura controlada. De modo a permitir uma temperatura mais alta e maior tempo de resfriamento entre as camadas recém depositadas.

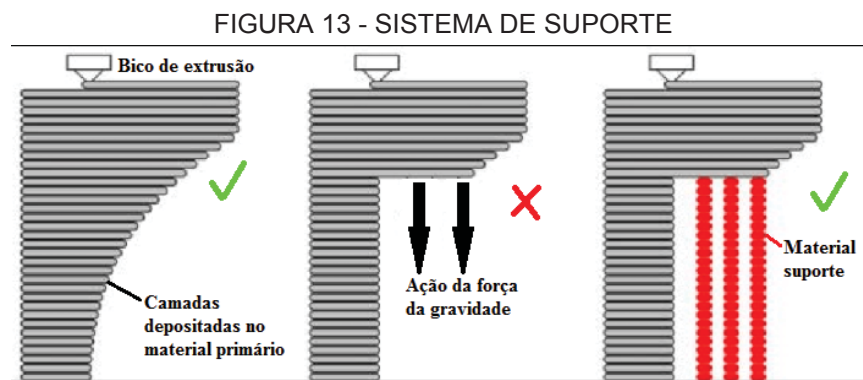
-Item (2). Baixa adesão: Neste exemplo, devido ao delta da temperatura da camada recém depositada com a anterior, não houve uma boa fusão entre os filamentos, causando uma baixa adesão entre as camadas.

-Item (3). Boa adesão: Nesta camada a temperatura e tempo de resfriamento permitiu uma boa difusão e adesão entre as camadas.

Devido a cilindricidade dos filamentos, mesmo com um preenchimento teórico de 100% de densidade (percentagem de preenchimento), ainda observamos espaços vazios, entre as camadas laterais e verticais de filamentos devido à natureza de interface dos filamentos (HERNANDEZ et al., 2020).

2.2.3 Impressão de material de suporte

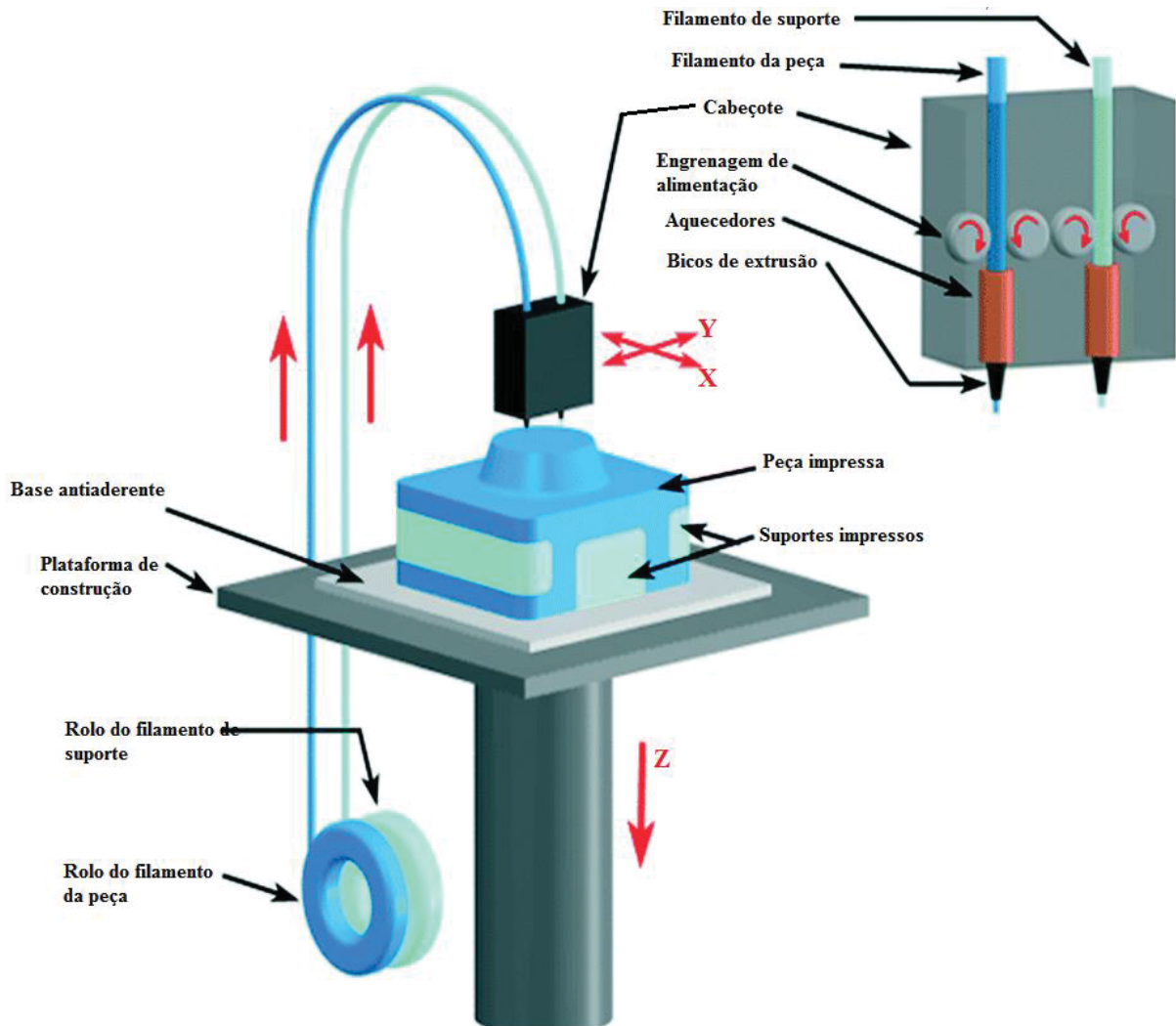
Um desafio da impressão 3D em camadas é advindo da necessidade de fazer uma camada sobre um local em que não havia material na camada anterior. Como não se pode imprimir sobre o vazio, foram desenvolvidos dois métodos para solucionar esse problema. Na FIGURA 13 podemos observar na imagem da esquerda a primeira possibilidade, onde cada camada se estende um pouco mais longe do que a anterior, não perdendo assim o seu suporte. A imagem central mostra uma situação onde não seria possível concluir a impressão, pois no momento que a primeira camada fosse impressa sobre o vazio ela cederia, isso se repetiria nas camadas acima estragando a peça. Para geometrias onde não é possível fazer o avanço gradual foi desenvolvido um sistema de suporte, como podemos ver na direita da FIGURA 13. Esse material pode ser removido mecanicamente ou dissolvido após a impressão restando apenas a peça desejada (WAHEED et al., 2016).



Fonte: Adaptado WAHEED, (2016).

De modo a possibilitar o sistema de impressão com suporte, foi desenvolvido um tipo de impressora FDM com dois cabeçotes e bicos injetores. Na FIGURA 14 é demonstrado o funcionamento desse tipo de impressora. Pode-se observar que devido a geometria da peça sendo impressa, a única forma de efetuar uma impressão adequada seria com a utilização de um suporte.

FIGURA 14 - IMPRESSORA FDM COM DOIS CABEÇOTES E BICOS INJETORES



Fonte: Adaptado 3D PARTS, (2021).

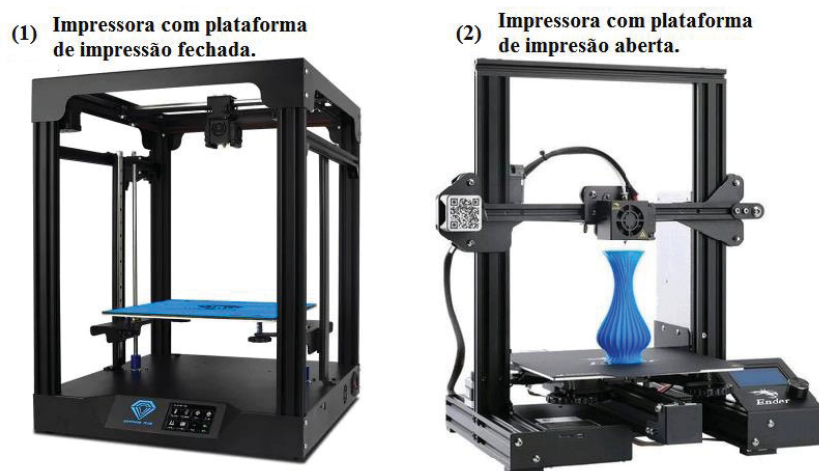
As impressoras mais simples não costumam oferecer a funcionalidade de extrusão de filamento de suporte. Nessas situações, pode ser necessário imprimir uma estrutura em baixa densidade composta pelo filamento primário, que servirá de suporte e deverá ser removida mecanicamente.

2.2.4 Plataforma de impressão

A plataforma de impressão de uma impressora FDM é um componente muito importante, pois além de ser a base onde a peça será fixada, também pode ser aquecida. Esse aquecimento, gera um gradiente de temperatura na peça, que contribui para melhorar o mecanismo de adesão entre os filamentos, que é a difusão (CHACÓN et al., 2017).

Para impressoras do tipo FDM, há dois tipos de plataforma de impressão; a fechada e a aberta. Conforme mostrado na FIGURA 15, a plataforma fechada possui um volume enclausurada que envolve a peça sendo fabricada. Isso permite que a plataforma de impressão, assim como todo aquele ambiente interno, tenha uma temperatura controlada. Essa funcionalidade é indispensável para impressão com certos tipos de filamento que são mais sensíveis à mudança de temperatura. Já a plataforma aberta, como seu nome sugere, possui uma plataforma de impressão que é aberta em relação ao ambiente externo. Nesse tipo de plataforma a peça estará sujeita aos efeitos da temperatura ambiente.

FIGURA 15 - PLATAFORMA DE IMPRESSÃO



FONTE: Adaptado, Topink3d, (2020).

Às vezes é necessário remover rapidamente da impressora a peça recém impressa, de modo a se iniciar outra impressão. Isso muitas vezes não é possível devido ao nível de aderência entre a peça e plataforma. Remover a peça forçosamente pode danificar tanto a peça como a plataforma. De modo a solucionar esse problema foi desenvolvido um filme base que pode ser utilizado em cima da plataforma de

impressão. Isso permite uma remoção mais fácil da peça após esta estar finalizada (SLIPESH et al., 2018).

2.2.5 Impressoras de sistema aberto e sistema proprietário.

As impressoras 3D com sistema proprietário ou fechado, são impressoras 3D bem desenvolvidas e altamente confiáveis. Essas impressoras são controladas por um sistema de software específico e são projetadas de forma que possam processar um único material predeterminado. Tudo nessa máquina é otimizado para o uso de um material ofertado por um fornecedor específico. Nesse tipo de sistema temos uma cadeia de suprimento mais engessada, pois os materiais, softwares e assistência técnica advém de apenas um fornecedor. Mas em contrapartida a peça final tem uma qualidade consistente, pois todo o sistema foi desenvolvido de modo a trabalhar com um material e sistema específicos (DDDROP 2018).

Recentemente, surgiram no mercado, impressoras 3D profissionais com sistema aberto. Essas impressoras podem ser controladas por diferentes programas de *software* e, mais importante, podem processar uma larga gama de materiais de diversos fornecedores. Na FIGURA 16 é explicitado algumas vantagens e desvantagens de cada um dos sistemas.

FIGURA 16 – IMPRESSORAS DE SISTEMA PROPRIETARIO (FECHADO) E ABERTO

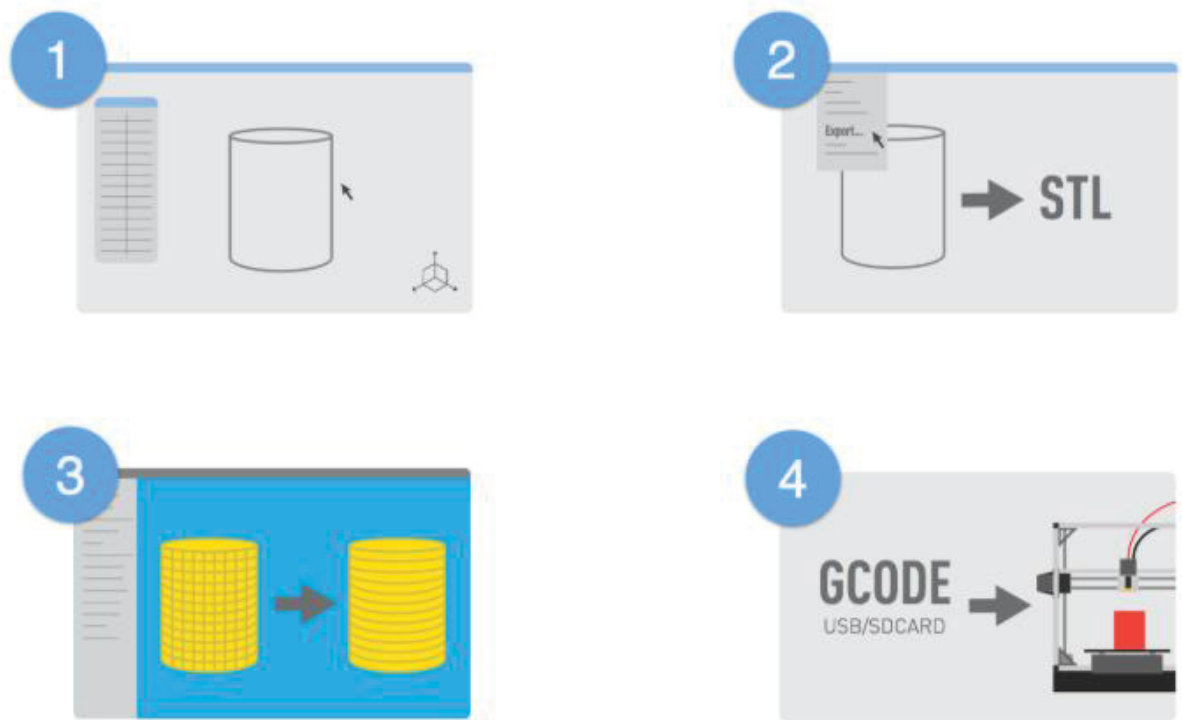


Em situações onde não é possível assistência técnica externa ou há a necessidade de compra de material mais baratos, impressoras de sistema aberto seriam mais indicadas. Por outro lado, espera-se mais conhecimento e experiência dos engenheiros 3D, de modo a contornar os desafios, em entregar peças com consistência (DDDROP 2018).

2.2.6 Preparação do Arquivo para Impressão

As etapas seguidas na preparação do arquivo para a fabricação por FDM é apresentado na FIGURA 17.

FIGURA 17 - ETAPAS DA PREPARAÇÃO DO ARQUIVO PARA IMPRESSÃO 3D FDM



FONTE: Adaptado, RAO V., (2019).

- Item (1). Modelo virtual 3D do objeto: O modelo virtual pode ser alcançado usando um *scanner* tridimensional (como CT), *software* de desenho assistido por computador (CAD) ou utilizando a tecnologia de fotogrametria que obtém o modelo através da combinação de imagens do objeto obtidas por um processo de digitalização de fotos realizado em diferentes posições. A FIGURA 18 traz um exemplo de uma peça nessa fase.

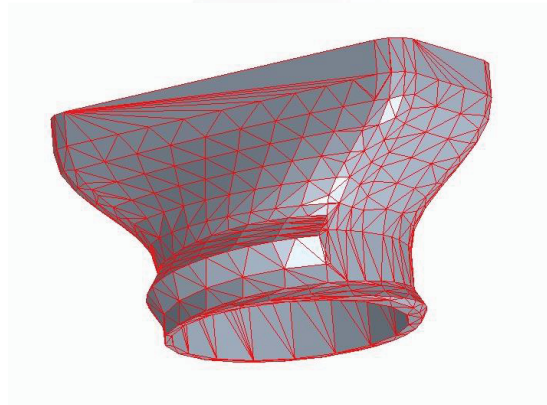
FIGURA 18 - MODELO VIRTUAL 3D DO OBJETO



Fonte: O Autor, (2021).

- Item (2). Conversão para STL: É necessário um software que seja capaz de salvar o modelo 3D em um arquivo STL, normalmente os programas de CAD atuais, já possuem essa função. Esse arquivo STL contém uma lista de coordenadas que armazenam as informações sobre as superfícies do modelo, que são reduzidas a formas geométricas como triângulos. Um exemplo desta etapa pode ser visto na FIGURA 19.

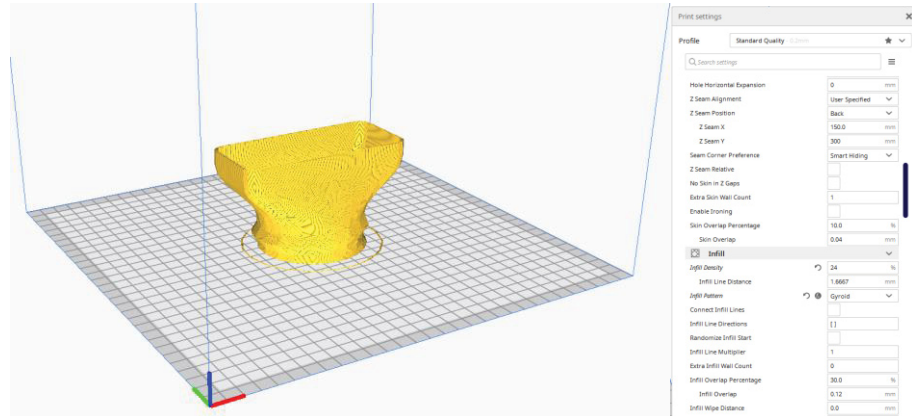
FIGURA 19 - CONVERSÃO PARA STL



Fonte: O Autor, (2021).

- Item (3). Inserção no *software slicer*: Há diversos softwares que efetuam o fatiamento do modelo 3D, o que foi utilizado nesse projeto é o CURA V4.5. Nesse momento é feita a escolha de todos os parâmetros de impressão. A FIGURA 20 mostra essa etapa.

FIGURA 20 - INSERÇÃO NO SOFTWARE SLICER

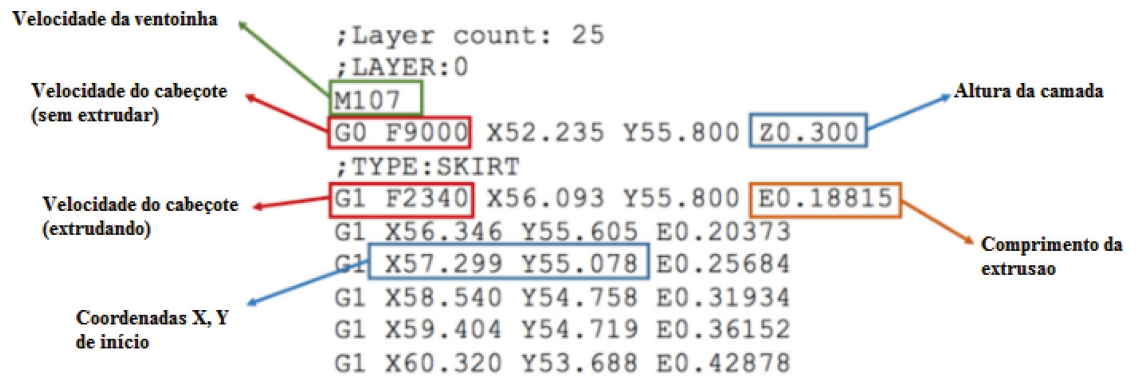


Fonte: O Autor, (2021).

Item (4). Obtenção do G-Code para impressão: O programa que faz o fatiamento da peça 3D, após esse processo, juntamente com os parâmetros de impressão escolhidos gera um arquivo que se chama G-Code. Esse arquivo é um código que é lido pela impressora 3D e contém todas as informações necessárias para realizar a fabricação da peça.

Na FIGURA 21 é mostrado um exemplo de G-Code com a explicação de algumas das funções que estão contidas nele. Como a velocidade da ventoinha, que é um sistema de refrigeração que evita o superaquecimento do cabeçote de extrusão, o código iniciado por "M". Também há o código "G0" e "G1" que correspondem à velocidade de deslocamento do cabeçote enquanto está em deslocamento sem extrudar (motor de alimentação parado), e a velocidade do cabeçote enquanto está extrudando, respectivamente. Adicionalmente temos um exemplo dos códigos "Z" que se refere à altura da camada na coordenada "Z", o código "E" que é o comprimento da extrusão sendo feita, e os códigos "X" e "Y" que são as coordenadas de início da extrusão (GAO et al., 2018).

FIGURA 21 - OBTENÇÃO DO G-CODE PARA IMPRESSÃO



Fonte: Adaptado GAO, (2018).

A partir desse momento a preparação do arquivo digital para fabricação está completa e podemos dar início ao processo de fabricação. O carregamento do arquivo na impressora pode ser feito de diversas formas, por *pen-drive*, pela rede, por *bluetooth* ou *wi-fi*. Nesse momento, com a impressora totalmente funcional e com matéria prima de início a impressão em 3D.

Na FIGURA 22 vemos um exemplo da peça mostrada anteriormente, já impressa em 3D utilizando um filamento de PLA puro.

FIGURA 22 -PEÇA IMPRESSA EM 3D



Fonte: O Autor, (2021).

Esse exemplar finalizado é mostrado de maneira a completar as etapas descritas acima com o objeto final. Os detalhes de impressão serão abordados mais à frente.

2.2.7 Parâmetros de Processo

Esse tópico tratará dos diferentes parâmetros que são necessários para definir como efetuar uma impressão 3D eficiente e funcional. É entendido por Parâmetros de Processo, todos os parâmetros funcionais pertinentes ao projeto da peça, como a densidade de preenchimento, o tipo de preenchimento, a largura da parede externa e a orientação de impressão. Sendo esses os parâmetros que devem ser decididos tomando em conta os requisitos funcionais e estéticos da peça que será fabricada.

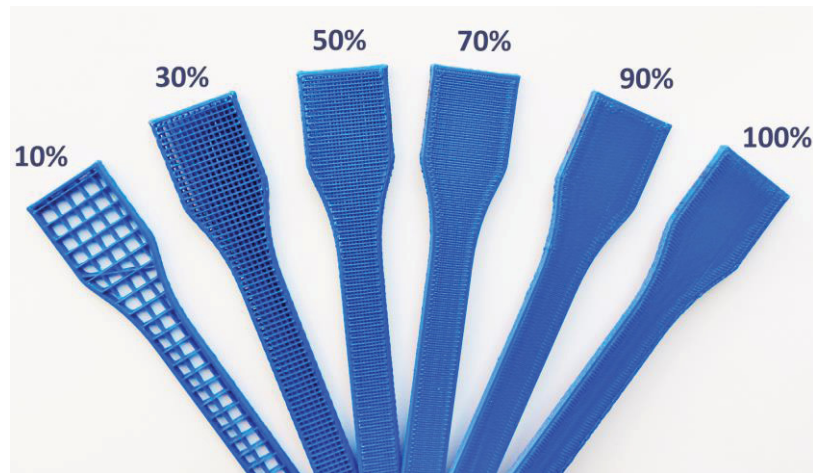
2.2.7.1 Densidade ou porcentagem de preenchimento

Uma das funcionalidades da impressão 3D é que esse processo torna possível a alteração da densidade da peça sendo impressa. Uma das principais vantagens do preenchimento variável é que o interior pode ser impresso em vários graus de vaziez. Esse fator pode ser representado em outro termo denominado densidade de preenchimento.

Essa funcionalidade oferece possibilidades que anteriormente não seriam possíveis, pois com o controle da deposição de camada a camada, pode-se configurar a peça de modo que ela seja impressa parcialmente oca. Isso é interessante, pois dependendo da peça sendo fabricada, não é necessária resistência estrutural, portando, pode-se optar por um centro menos denso (CHACÓN et al., 2017). A densidade de preenchimento corresponde à quantidade de material que será utilizado no interior da peça. A peça pode ter de 0-100% de preenchimento interno.

Na FIGURA 23, podemos ver um exemplo de corpos de prova para tração impressos em 3D com diferentes níveis de preenchimento, na prática isso significa que apenas parte do volume interno da peça contém material e isso é alcançado através do espaçamento dos filamentos depositados (KIENDL 2016).

FIGURA 23 - PEÇAS COM VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE PREENCHIMENTO



FONTE: 3D Matter, (2021).

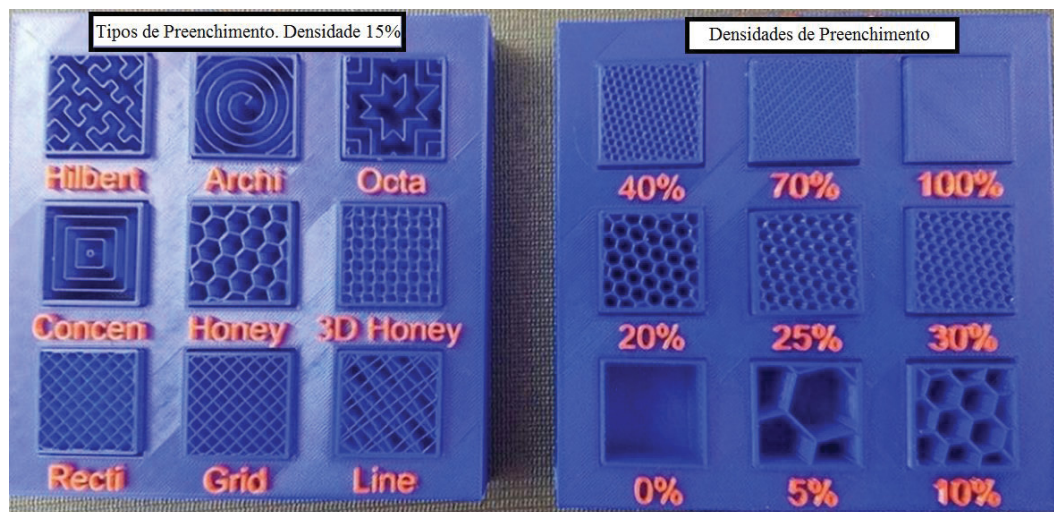
Se a densidade de preenchimento for 0%, significa que o modelo impresso está completamente vazio. Se for 100%, o modelo está totalmente sólido por dentro. Além de reforçar a estrutura, o preenchimento também determina a resistência e peso da peça final. A quantidade de preenchimento necessária para um modelo impresso em 3D depende exclusivamente do tipo e da funcionalidade final da peça.

Para uso como modelo ou peça decorativa como uma representação ou exposição, não é necessário que o modelo seja resistente, pois não terá demanda estrutural. Devido a este motivo, não é necessário um preenchimento que seja muito rígido para manter a estrutura unida. A densidade de preenchimento usada para este propósito pode ser feita em torno de 10-20%. Dessa forma, pode-se economizar material, assim como alcançar a finalidade necessária de resistência. Para modelos 3D que requerem mais resistência em comparação com a citada, sugere-se que a densidade de preenchimento seja aumentada para um valor em torno de 25-50% (POPESCU et al., 2018).

2.2.7.2 Tipo de preenchimento

Esse é o parâmetro que define qual será o tipo da geometria que forma a camada interna do objeto, e juntamente com a densidade de preenchimento é determinada a quantidade e localização do material no interior da peça. Há alguns formatos de preenchimentos que são mais utilizados, como é apresentado na FIGURA 24. Esses formatos são produzidos automaticamente pelo *software slicer* de acordo com o parâmetro estabelecido pelo usuário. Cada um dos tipos de preenchimento possui a sua vantagem, sendo ela estrutural, visual ou econômica. A escolha de qual formato utilizar no preenchimento interno da peça a ser produzida é crucial para garantir as características desejadas (GOLDSCHMIDT 2020).

FIGURA 24 - EXEMPLOS DE TIPOS E DENSIDADES DE PREENCHIMENTO INTERNO.



FONTE: Adaptado, GOLDSCHMIDT, (2020).

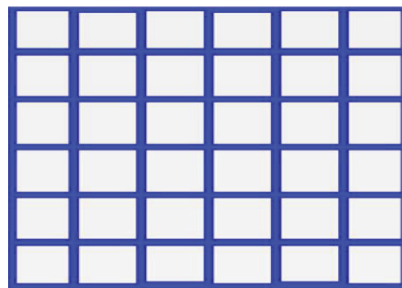
Como o *G-Code* oferece total flexibilidade sobre o traçado do cabeçote com bico de extrusão, pode-se, através da determinação da trajetória, determinar qual formato o preenchimento interno terá. Alguns tipos de preenchimento são mais resistentes e outros mais econômicos ou mais rápidos de imprimir para uma dada densidade. Apesar de possuir a mesma densidade, preenchimentos com mais linhas retas produzem impressões mais rápidas, pois reduzem a quantidade de mudanças de

direção do cabeçote durante a movimentação. Cada vez que é feita uma mudança de direção é necessária uma redução seguida de uma nova aceleração de modo a atingir a velocidade de impressão definida (LISELI et al., 2016).

Pode-se estudar as propriedades mecânicas de cada tipo de preenchimento, pois eles têm várias diferenças entre si. A seguir será feita uma breve explicação considerando três tipos de preenchimento mais comuns: grade, triângulos e tri-hexágonos (CABREIRA 2020).

- 1. A estrutura de grade é a mais simples e a mais fraca de todas. Ela consiste em uma sequência de linhas cruzadas que preenchem a parte interna da peça. A quantidade de linhas por camada irá depender da densidade interna escolhida. Porém, por ser uma grade simples, apesar dela ser mais fraca, ela pode ser impressa rapidamente em comparação com as demais. Na FIGURA 25 é apresentado um exemplo do desenho do preenchimento interno de grade.

FIGURA 25 - ESTRUTURA DE GRADE

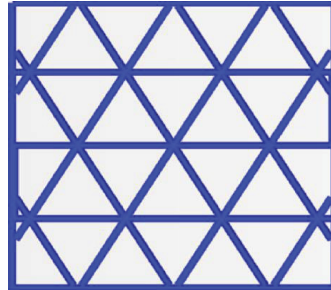


Fonte: Adaptado, CABREIRA, (2020).

- 2. Uma grande vantagem do padrão de triângulos é sua capacidade de suportar cargas quando aplicado perpendicularmente às paredes. O padrão triangular pode ser usado em áreas do modelo com pequenas formas retangulares, pois esse padrão faz mais conexão com as paredes em comparação com a grade. A FIGURA

26 mostra uma representação bidimensional do preenchimento tipo triângulos.

FIGURA 26 - ESTRUTURA DE TRIANGULOS

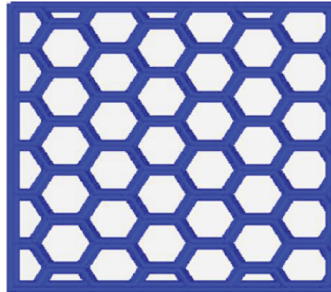


Fonte: Adaptado, CABREIRA, (2020).

- 3. O tri-hexágono é o mais forte de todos os três, possui uma combinação de triângulos e hexágonos. Incluir hexágono na malha de preenchimento interno o torna muito forte. É interessante observar que os favos de mel usam o mesmo polígono para sua malha. O preenchimento tri-hexágono é um formato tridimensional que usa hexágonos na maior parte do preenchimento e triângulos para locais onde não cabe o hexágono. Na FIGURA 27 é

apresentado um exemplo bidimensional do preenchimento de hexágono.

FIGURA 27 - ESTRUTURA DE TRI-HEXÁGONOS



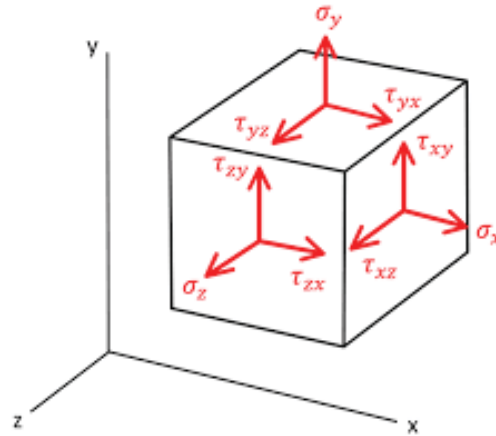
Fonte: Adaptado, CABREIRA, (2020).

Na fabricação de peças decorativas ou de exibição, é levado mais em conta a qualidade superficial externa e acabamento da peça, portanto nesses casos o tipo de preenchimento é escolhido de forma a tornar a impressão mais rápida ou econômica (GOLDSCHMIDT 2020).

A área de maior interesse nesse trabalho é para peças com demanda estrutural, nessas situações o tipo e a densidade de preenchimento devem ser cuidadosamente analisados de modo a se obter uma peça conforme e com a resistência necessária. Uma vez determinados os requisitos funcionais da peça, e em quais sentidos as forças estarão atuando, pode-se determinar qual o tipo de preenchimento mais adequado. Na FIGURA 28 temos um exemplo, um cubo em 3D com setas indicando forças sendo

aplicadas em vários sentidos. Essas forças de compressão, tração e cisalhamento ocorrem em peças com demanda estrutural.

FIGURA 28 - CUBO EM 3D



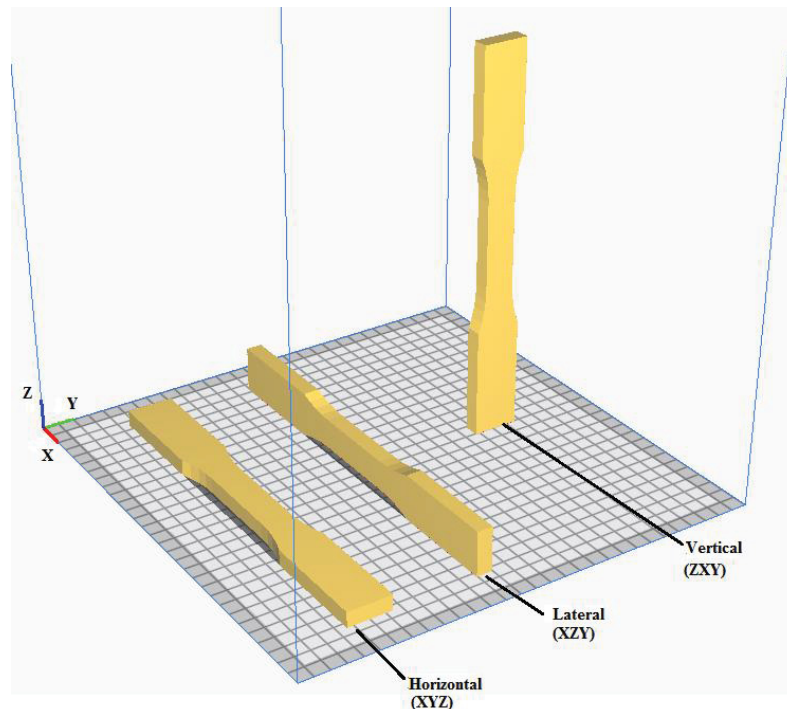
FONTE: Adaptado DOMINGUEZ, (2020).

Criar um diagrama similar para a peça sendo fabricada, mesmo que mental, é um passo importante na definição do preenchimento mais adequado para o esforço a qual será submetida.

2.2.7.3 Orientação da impressão

Esse parâmetro se refere à posição da peça em relação à plataforma de construção, se orientada na direção do eixo X, Y ou Z. A FIGURA 29 mostra uma imagem do *slicer* onde se define essa posição.

FIGURA 29 - ORIENTAÇÃO DA IMPRESSÃO



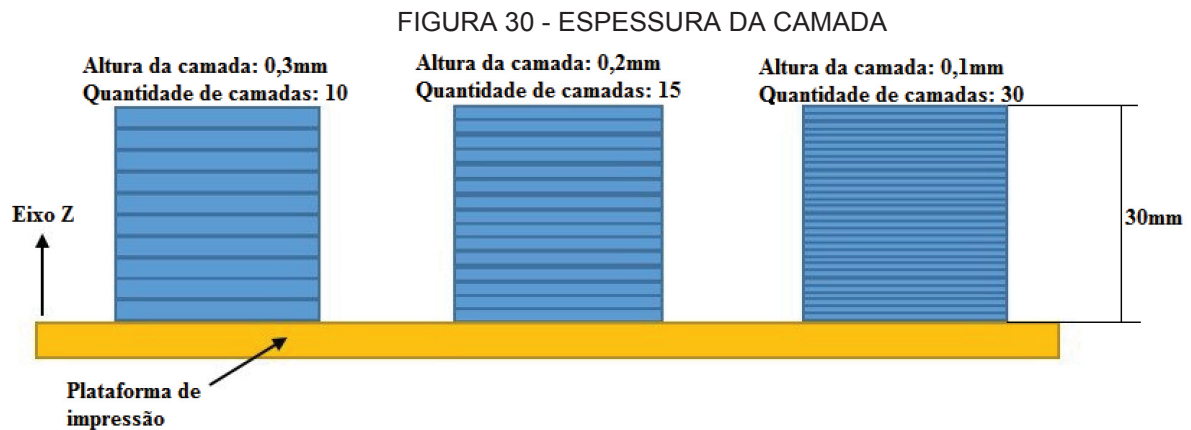
FONTE: O Autor, (2021).

Considerando que as camadas são construídas no sentido vertical no eixo Z, é importante levar essa característica em consideração. De modo geral as peças impressas em 3D por FDM possuem menor resistência para forças aplicadas no sentido de deposição das camadas. Ou seja, tomando como exemplo a FIGURA 29, o corpo de prova em posição vertical ofereceria menor resistência a forças de tração aplicadas em suas extremidades em comparação com os impressos horizontalmente. Isso ocorre, pois, as forças são absorvidas com mais eficiência quando são aplicadas no sentido da deposição do filamento, com as linhas de força correndo no sentido dos filamentos (CALIGNANO et al., 2020).

2.2.7.4 Espessura da camada

A espessura da camada se dá pelo aumento de distância que é feito em relação ao eixo Z, entre o cabeçote e plataforma de fabricação, ao findar de cada camada. Esse aumento de distância pode ser feito pela elevação do cabeçote ou pelo rebaixamento da plataforma, variando de acordo com o tipo de impressora. E está

diretamente ligada à qualidade da superfície externa da peça e a quantidade de camadas que serão depositadas para completar a peça. Na FIGURA 30, tem-se uma demonstração de como a altura da camada pode afetar a quantidade das camadas e consequente tempo de fabricação da peça final.

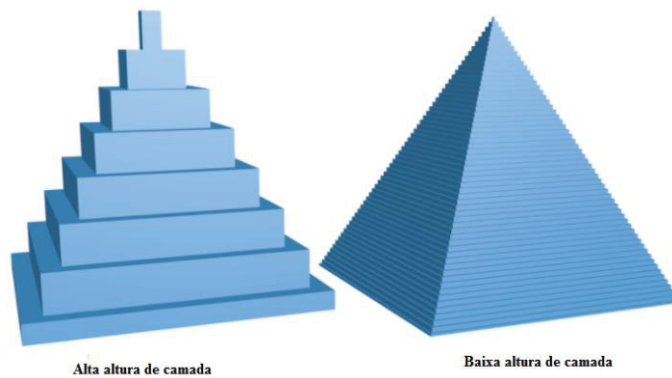


FONTE: Adaptado PICK 3D, (2021).

A altura de camada nunca deve ser maior do que o diâmetro do filamento sendo utilizado. Isso acontece porque se uma altura de camada for superior ao diâmetro do filamento, a nova camada não será depositada encostando na camada anterior, e isso irá impedir que os mecanismos de adesão entre as camadas ocorram podendo gerar um defeito na peça (CORRAL et al., 2019).

A altura de camada deve ser menor do que o diâmetro do filamento, gerando uma certa pressão durante o seu depósito. Isso também produz um efeito de ovalização do filamento cilíndrico, quando o mesmo é depositado, podendo ser observado na secção transversal da peça (ZHAOBING et al., 2019). Outro fator, que é o mais comumente associado à altura de camada, é a qualidade superficial final da peça. Na FIGURA 31 podemos observar duas imagens, uma representando a peça com altura de camada mais alta (esquerda) e a outra com altura mais baixa (direita).

FIGURA 31 - ALTURAS DE CAMADAS



FONTE: Adaptado PICK 3D, (2021).

Nota-se que a resolução externa da peça está diretamente associada a esse parâmetro, portanto, deve ser levado em conta durante a configuração da peça no *slicer*.

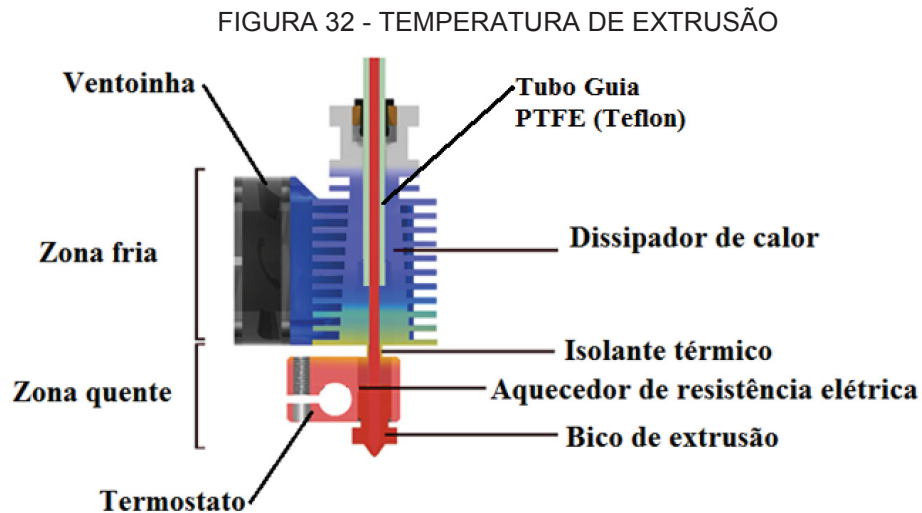
2.2.8 Parâmetros de Impressão

Parâmetros de Impressão é o termo utilizado para os parâmetros que são utilizados na programação da peça no *software slicer*, esses parâmetros levam em consideração informações como, por exemplo: a temperatura de extrusão, a velocidade de extrusão e a temperatura da plataforma.

2.2.8.1 Temperatura de extrusão

É a temperatura atingida no cabeçote de extrusão e deve ser escolhida de acordo com o material utilizado. Cada material possui uma faixa de temperatura ideal de extrusão, isso varia de acordo com a estrutura molecular do termoplástico que compõe o filamento. Outros fatores devem ser considerados na determinação de temperatura final de extrusão como se a impressora é de plataforma aberta ou fechada, a temperatura ambiente e também no acabamento e resistência desejados (LOVO et al., 2017).

Na FIGURA 32 é mostrado alguns dos elementos que compõe o cabeçote de extrusão. Essa região pode ser dividida em duas zonas, uma quente e a outra fria.



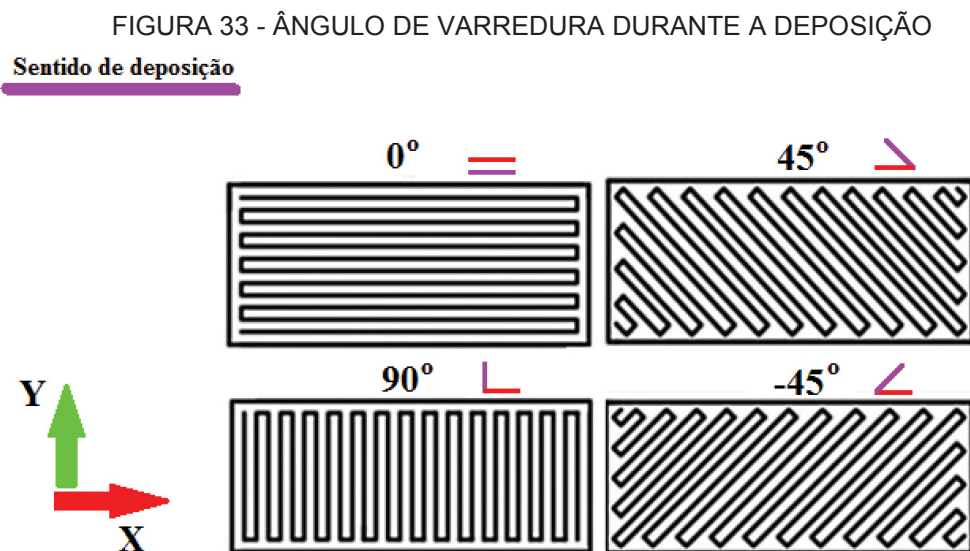
FONTE: Adaptado FILAMENT2PRINT, (2017).

A zona quente sendo a que faz a fusão do filamento e a fria a região de onde o filamento é alimentado. Uma ventoinha juntamente com um dissipador de calor é responsável por evitar que o filamento aqueça e amoleça antes de chegar no local adequado, e um isolante térmico separa a zona quente da fria. A trajetória do filamento dentro da zona fria é guiada por um tubo de PFTE (Teflon), esse tubo sofre degradações e deve ser substituído ocasionalmente. Na zona quente uma resistência acionada por corrente elétrica, é responsável por fazer o aquecimento do bloco, e um termostato reporta a temperatura do local. Com essa leitura a impressora aumenta ou reduz a corrente elétrica, sendo enviada para a resistência de modo a controlar o aquecimento. Logo após a resistência elétrica temos o bico extrusor, que é o último elemento desse componente e estabelece o diâmetro final do material sendo depositado (FILAMENT2PRINT 2017).

É importante manter um gradiente de temperatura adequado na alimentação e fusão do filamento. Se o filamento na zona fria aquecer demais, pode perder a sua rigidez e quando for empurrado em direção ao bico, pelas engrenagens alimentadoras, pode se deformar ou se partir, ocasionando uma falha que necessitaria de manutenção (FILAMENT2PRINT 2017).

2.2.8.2 Ângulo de varredura

O ângulo de varredura, também conhecido como *raster angle*, é o ângulo da trajetória que o bico irá percorrer para completar cada camada em relação ao eixo X da máquina. Esse é um parâmetro importante, pois define o direcionamento dos filamentos na peça (ZHAOBING et al., 2019). Na FIGURA 33 pode ser observado uma representação do *raster angle* nos filamentos depositados no interior da peça.



FONTE: Adaptado, ZHAOBING, (2019).

Na deposição em 0 graus os filamentos são depositados em linha em relação ao eixo X da máquina. Na deposição em 90 graus são depositados em linha em relação ao eixo Y ou em um ângulo reto em relação ao eixo X. Na configuração de -45 e 45 graus ele é depositado com essa inclinação para alguns dos lados em relação, novamente ao eixo X.

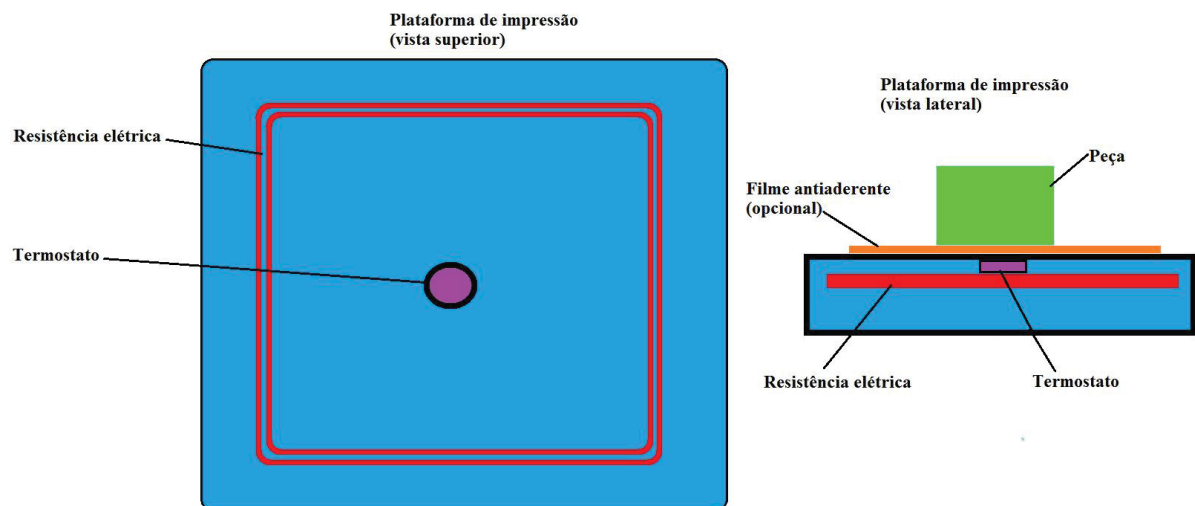
O ângulo de varredura escolhido pode determinar em qual sentido a peça terá maior resistência mecânica, pois como visto anteriormente, isso acontece no sentido de deposição. Isso acontece pois no rompimento da peça, mais facilmente acontece a separação das camadas, do que pelo rompimento do filamento (CALIGNANO et al., 2020).

2.2.8.3 Temperatura da plataforma de impressão

A plataforma de impressão, sendo ela aberta ou fechada (enclausurada), possui um sistema de aquecimento por resistências elétricas. Esse sistema é responsável por garantir a adesão da peça à plataforma durante a impressão, assim como fornecer um gradiente de temperatura à peça contribuindo para a melhor adesão entre as camadas depositadas.

A FIGURA 34 traz uma ilustração dos elementos presentes no sistema de aquecimento de uma plataforma. A corrente elétrica, que é enviada para a resistência aquecer é destinada pela impressora de acordo com o parâmetro escolhido pelo usuário. Através da leitura fornecida pelo termostato é regulada a corrente enviada de modo a manter-se estável a temperatura definida da plataforma. Outro elemento opcional que pode ser utilizado, é o filme antiaderente, esse filme facilita a remoção da peça da plataforma de impressão após a sua finalização (ZHAOBING et al., 2019).

FIGURA 34 - TEMPERATURA DA PLATAFORMA DE IMPRESSÃO



FONTE: O Autor, (2021).

A temperatura da plataforma tem um papel mais crucial em plataformas de impressão abertas, pois como a peça está exposta à temperatura ambiente, que é

mais baixa do que a temperatura da plataforma, a peça tende a esfriar nas camadas superiores. Esse resfriamento advindo da diferença de temperatura entre a peça e o ambiente, atrapalha a fusão entre as camadas sendo depositadas. Portanto, deve ser feita uma análise cuidadosa em peças muito altas (no eixo Z), pois as camadas superiores não terão todos os benefícios do aquecimento decorrente da plataforma aquecida.

2.2.8.4 Velocidade de impressão

A velocidade de impressão é a principal configuração de velocidade que influencia as impressões 3D. Como o nome sugere, a velocidade de impressão determina a rapidez com que os motores da impressora se movem. Isso inclui os motores que controlam os eixos X e Y, bem como os motores das engrenagens da extrusora de filamentos, sendo eles filamentos da peça ou de suporte. Podemos dividir o parâmetro de velocidade de impressão em 4 parâmetros distintos, que são como segue (KONODO 2021, CURA V4.5):

- A velocidade de impressão da casca ajusta a velocidade com que o perímetro externo do modelo é impresso. Normalmente é diminuído quando se busca melhorar a qualidade da superfície externa.
- A velocidade da parede interna ajusta a velocidade com que a parte interna do modelo é impressa. Normalmente é igual à velocidade geral da impressão.
- A velocidade de preenchimento interno ajusta a velocidade de impressão do preenchimento do modelo. Normalmente é igual à velocidade geral de impressão.
- A velocidade das camadas superiores e inferiores ajusta a velocidade com que as partes superiores e inferiores do modelo são impressas. Normalmente é reduzido para melhorar a qualidade da superfície externa.

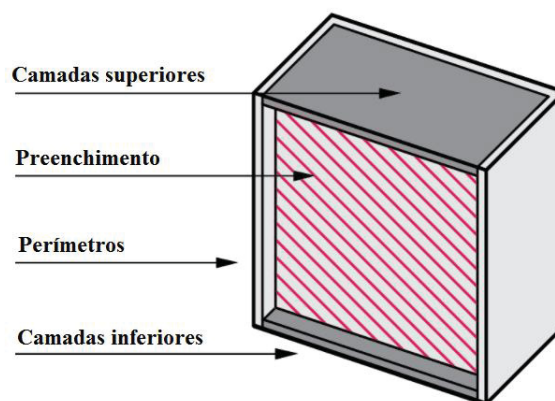
2.2.8.5 Casca do modelo

A casca do modelo, composta pelos perímetros laterais e camadas superior e inferior, compõe a superfície da parte externa de uma peça. Em FDM, os perímetros são sempre as primeiras partes a serem impressas em cada camada.

Se uma impressão deve ser lixada ou passar por um processo de alisamento químico, deve-se aumentar a espessura da casca, pois esses métodos de pós-processamento reduzem a espessura da superfície externa do modelo. Qualquer aumento no número de camadas de perímetro também aumenta a quantidade de tempo e material necessário para imprimir o modelo, aumentando o custo geral da peça (CAIN 2019).

Os perímetros normalmente consistem em um determinado número multiplicado pelo diâmetro do bico sendo utilizado na impressão. Deve-se projetar as cascas para serem um múltiplo do diâmetro do bico para evitar a formação de vazios. Na FIGURA 35 vemos um exemplo das partes que compõem a casca da peça, e da região interna que é chamada de Preenchimento.

FIGURA 35 – COMPOSIÇÃO DA CASCA DO MODELO



FONTE: Adaptado CAIN, (2019).

A resistência da peça pode ser melhorada aumentando a espessura da casca. Isso permite uma impressão um pouco mais robusta sem ter que aumentar a

quantidade de material usada no preenchimento. A maioria dos programas de fatiamento permite que a espessura da casca seja ajustada, permitindo que regiões de alta tensão sejam personalizadas com uma alta densidade de casca, oferecendo áreas localizadas de alta resistência (CAIN 2019).

2.2.9 Defeitos de impressão comuns em impressoras FDM

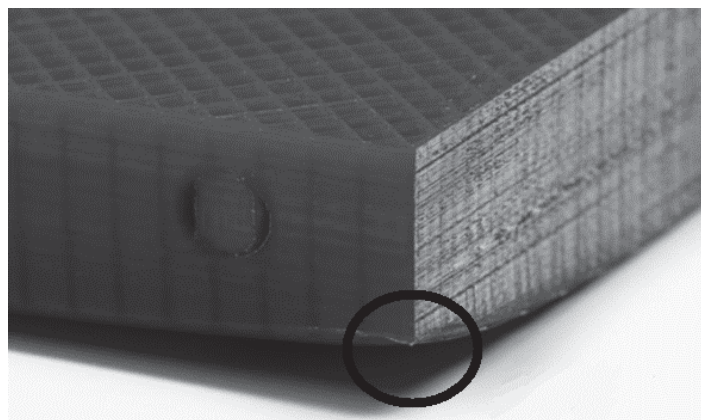
A seção a seguir aborda alguns problemas presentes na impressão 3D por FDM, as potenciais causas e resoluções. Sendo esses problemas que ocorreram durante a execução deste trabalho e foram solucionados de modo a obter peças conformes e resultados reproduzíveis. Foram problemas decorrentes de diversas inconformidades, tanto de parâmetros de processo como de parâmetros de impressão.

Uma impressora bem calibrada, parâmetros corretos e um operador experiente, são fundamentais para evitar esses problemas.

2.2.9.1 Empenamento

Isso acontece quando as primeiras camadas descolam da plataforma e causam o empenamento do resto da peça. Esse é um problema cada vez mais raro, visto que tanto filamentos como plataformas aquecidas, são desenvolvidas de modo a ter a melhor adesão possível. Na FIGURA 36 é apresentado um exemplo desse efeito.

FIGURA 36 - EMPENAMENTO



FONTE: Adaptado BITFAB,(2021).

Esse defeito pode ser causado por falta de aderência na plataforma e pode ocorrer devido à altura incorreta do bico em relação à plataforma, o nivelamento incorreto da plataforma, temperatura muito baixa da plataforma ou também pela falta de adesão à superfície de impressão da plataforma.

Outra possibilidade para esse defeito, pode decorrer da contração térmica das camadas superiores, que ao “encolher”, puxam as camadas inferiores. Se isso ocorrer, a superfície de impressão pode até quebrar se for um filme antiaderente, pois o adesivo será arrancado da base. Isso acontece principalmente com materiais como ABS ou Nylon, devido à sua contração térmica e sensibilidade à temperatura, é um caso difícil de acontecer durante a impressão de PLA (PRINTFAB 2021), por exemplo.

Para a falta de adesão existem várias soluções, se estivermos usando uma base de vidro, é recomendável usar algum adesivo para aumentar a fixação da peça. Um produto bastante utilizado é *spray* de para fixação de cabelo. Se estivermos usando ABS, podemos aplicar uma camada da mistura conhecida como pasta de ABS, que pode ser feito dissolvendo o ABS em um recipiente com acetona.

Se o problema está relacionado à contração térmica, aumentar a adesão não vai adiantar, pois como já falamos, o ABS quando deformado pode quebrar até a base de impressão. Para resolver este problema, pode-se cobrir a impressora, caso for uma de plataforma aberta, com algo disponível como caixa grande ou utilizar um aquecedor com ventilador a uma certa distância da peça sendo impressa. O objetivo é que não haja muita diferença entre a temperatura das primeiras camadas e a temperatura das camadas superiores, que estão mais distantes do calor da plataforma. E consequentemente diminuindo a contração térmica da peça.

2.2.9.2 Delaminação

As fissuras são quando as camadas de uma peça não estão bem unidas, resultando na separação dessas camadas (por isso o nome delaminação). Esse problema pode ser causado por dois motivos diferentes: pela má adesão entre as

camadas ou pela contração térmica. Mesmo que as camadas se unam bem, a diferença de temperatura entre as diferentes seções da peça, faz com que ela se deforme, resultando na separação de algumas camadas (BITFAB 2021). Pode-se observar na FIGURA 37 um exemplo desse defeito em uma peça impressa com o material PLA em uma impressora do tipo FDM.

FIGURA 37 - DELAMINAÇÃO



FONTE: Adaptado BITFAB, (2021).

Se o problema for falta de adesão, geralmente é devido à baixa temperatura de impressão ou da peça sendo impressa. A maioria dos filamentos tem uma faixa de temperatura na qual podem ser impressos. Dentro desta faixa, os valores menores nos darão uma aparência estética melhor, pois a deposição ficará “mais limpa” com menos ondulações geradas por variação térmica. Por outro lado, valores mais altos nos darão uma melhor adesão entre as camadas. Materiais de impressão, como o ABS, são bem sensíveis a temperatura e se for utilizada uma temperatura inferior à adequada, isso poderia levar a rachaduras entre as camadas (SCHIAVONE et al., 2020)

Por outro lado, se o problema for a contração térmica a solução é mais complicada, pois devemos conseguir criar um ambiente mais quente na área de impressão diminuindo a diferença de temperatura entre a camada sendo depositada e a peça já impressa. A solução ideal, seria cobrir a impressora, conforme comentado na seção anterior (BITFAB 2021).

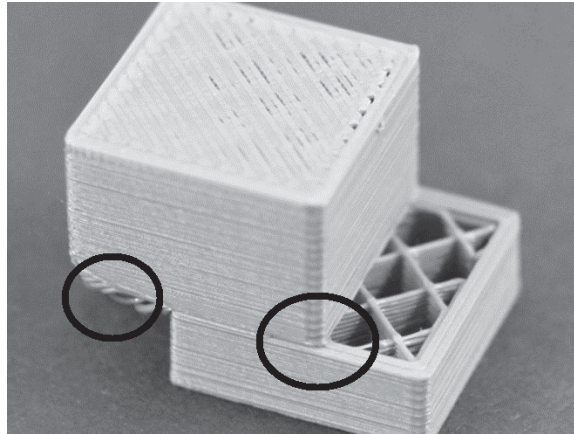
2.2.9.3 Deslocamento das camadas

O deslocamento de camada é um problema que ocorre em algum eixo a uma certa altura da impressão. Pode ocorrer no eixo X, eixo Y ou mesmo em ambos simultaneamente, assim como no eixo Z (BITFAB 2021). As causas mais comuns de deslocamento de camada são:

- Temperatura excessiva nos motores ou acionadores: Os componentes eletrônicos em geral não são projetados para operar continuamente em temperaturas muito altas. E devido à resistência adicional em um motor aquecido, o mesmo pode não proporcionar o deslocamento intencionado com o envio da corrente elétrica normal.
- Falta de potência nos motores: Geralmente causada por uma corrente muito baixa chegando aos motores. Pode ser uma falha vinda da placa ou um sistema ligado a uma fonte de tensão, mais baixa do que a adequada.
- Falha mecânica: Pode acontecer que, alguns dos dentes quebrados na correia ou que haja alguns detritos nos eixos, podem causar um atolamento no movimento do cabeçote ou da base da impressora. Às vezes, um componente mal apertado também pode causar defeitos de deslocamento da camada, quando todo o eixo se move livremente e o acionamento do motor de passo não resulta no movimento intencionado na peça sendo impressa.

Na FIGURA 38 é apresentado um exemplo de uma impressão, em que houve um deslocamento de camadas no eixo X, aproximadamente depois de 30% do início da impressão. Também pode-se notar que devido a esse deslocamento, a primeira camada depositada depois do deslocamento foi impressa parcialmente sobre o vazio. Apesar disso, após algumas camadas, esse material atuou como uma forma de suporte e na sequência a peça voltou a tomar a forma desejada, apesar de já está inutilizada.

FIGURA 38 - DESLOCAMENTO DE CAMADAS



FONTE: Adaptado BITFAB, (2021).

Uma solução geral para esses defeitos, seria utilizar dissipadores de calor, e se possível ventilação para os controladores de velocidade da impressora 3D. Esses componentes são responsáveis por enviar toda a corrente consumida pelos motores, e tendem a esquentar. Da mesma forma, se a impressora estiver operando em ambientes muito quentes, seria interessante adicionar algum dissipador de calor aos motores dos eixos X e Y. Se os controladores estiverem muito quentes, as vezes pode se ouvir um estalo intermitente nos motores, isso ocorre quando os controladores são desconectados automaticamente por estarem superaquecidos, de modo a dar-lhes tempo para esfriar (TÜRKMEN et al., 2017).

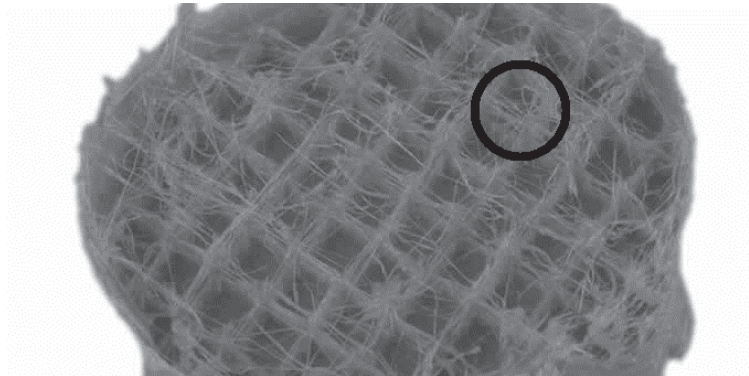
Também é necessário verificar, se os eixos da impressora estão limpos e sem obstruções, se as correias e mancais não estão apertados demais (se os mancais estiverem apertados com flanges ou parafusos). Eixos contaminados e correias muito tensionadas, geram mais resistência, fazendo com que os motores sejam mais forçados e, possivelmente, percam o passo (para motores com sistema de passo presentes nas impressoras FDM).

2.2.9.4 Teias no preenchimento interno

Teias no preenchimento interno é um dos problemas mais comuns em peças impressas por iniciantes no mundo da impressão 3D, sendo um defeito muito fácil de

resolver. A teia aparece quando, o bico de extrusão se move entre duas seções de nossa impressão, em situações onde há uma grande separação, e entre um ponto e outro de deposição na camada. Uma pequena quantidade de plástico fundido goteja do bico e gruda em ambas as seções, deixando um pequeno fio de conexão na trajetória percorrida pelo cabeçote (BITFAB 2021). Um exemplo de formação de teias em uma peça pode ser visto na FIGURA 39.

FIGURA 39 - TEIAS NO PREENCHIMENTO INTERNO



FONTE: Adaptado BITFAB, (2021).

Este problema pode ser causado pelo uso de um cabeçote de aquecimento de má qualidade, mas como normalmente as máquinas possuem cabeçote de qualidade suficiente, então o problema quase sempre, vem da má programação no *slicer*.

Os parâmetros que devem ser verificados no *slicer* para minimizar a formação de teias são:

- Temperatura: É um fator vital e provavelmente uma das configurações mais importantes da impressão. Se há uma grande formação de teias, provavelmente está sendo utilizada uma temperatura muito alta de extrusão que levam a redução da viscosidade do fundido. Todos os materiais possuem uma faixa de temperatura nas quais podem ser impressos, portanto, pode-se diminuir a temperatura e aproximá-la do limite mínimo recomendado pelo fabricante.

- Distância de retração: Embora não seja possível “sugar” o plástico para fora do bico, já que nenhuma pressão negativa pode ser criada no material no estado semilíquido, é possível minimizar a pressão interna do bico acionando os motores de alimentação em reverso, puxando o filamento para fora da zona quente do cabeçote. A distância de retração depende do equipamento, material e temperatura. A maioria das impressoras FDM tem um bom desempenho com um valor de retração entre 0,5 mm e 2 mm, esse parâmetro deve ser configurado no *slicer*.

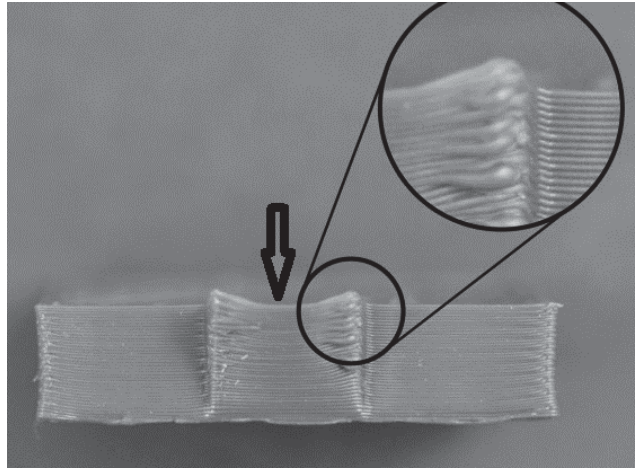
- Velocidade de retração: É outro fator importante, pois quanto maior a velocidade, menor a formação de teias. Esta velocidade dependerá do motor da extrusora e também do tipo de extrusão. Valores entre 40 mm/s e 60 mm/s costumam trazer um resultado favorável na redução ou eliminação desse defeito.

Adicionalmente, quase todos os *slicers* têm configurações diferentes e específicas mais avançadas, que podem ajudar a reduzir a formação de teias. Porém, isso só será útil se os três parâmetros mostrados anteriores estiverem bem ajustados.

2.2.9.5 Superaquecimento e colapso

Como pode-se ver na FIGURA 40, utilizar uma temperatura excessiva para extrusão fará com que as peças pareçam deformadas, com o centro da camada afundado. Isso ocorre porque quando derretido em uma temperatura muito alta, o material não tem tempo para resfriar, e é por isso que as camadas podem colapsar ou afundar nas regiões centrais que concentram mais o calor, por ter menos contato com o ambiente externo (TURKMEN et al., 2018).

FIGURA 40 - SUPERAQUECIMENTO E COLAPSO



FONTE: Adaptado BITFAB, (2021).

Essas deformações serão muito mais pronunciadas em áreas pequenas, como pequenos picos, onde ao invés de um formato bom, ficará uma geometria deformada.

A solução para este problema é a redução da temperatura de extrusão ou do ambiente, caso for uma plataforma enclausurada. Também pode-se otimizar o parâmetro da velocidade da ventoinha pós extrusão (se disponível no equipamento), ou temperatura ambiente. Pois, uma temperatura elevada pode favorecer uma extrusão mais fluida e pode-se compensar essa temperatura com um bom resfriamento. Desta forma, o material será resfriado rapidamente e após a extrusão, acarretará melhores resultados (BITFAB 2021).

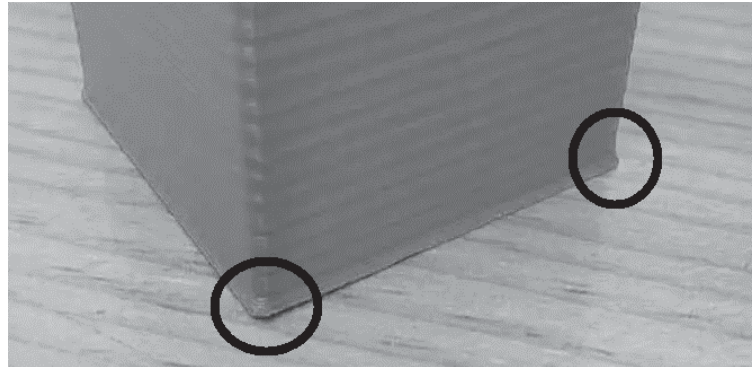
2.2.9.6 Ressalto nas bordas da base

O ressalto na base é um defeito que consiste na expansão no plano horizontal das primeiras camadas da impressão. Isso pode ocorrer devido a dois fatores ou, uma combinação de ambos: o bico está muito próximo à plataforma ou a temperatura da plataforma está muito alta (BITFAB 2021).

Se o bico estiver muito próximo à plataforma, evidentemente as primeiras camadas serão mais achatadas e, portanto, se expandirão no plano XY. Para resolver este problema, devemos nivelar corretamente a plataforma e logo a primeira camada.

Pode-se ver um exemplo desse defeito na FIGURA 41 mostrando uma expansão horizontal na base da peça. Esse fator pode ser agravado em peças muito altas e conseqüentemente mais pesadas.

FIGURA 41 - RESSALTO NAS BORDAS DA BASE

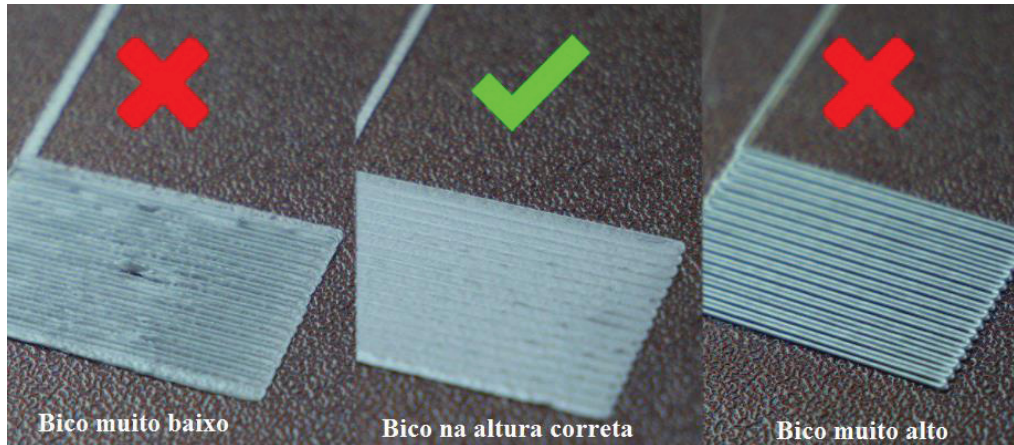


FONTE: Adaptado BITFAB, (2021).

Uma temperatura excessiva da plataforma, pode fazer com que o plástico recém-depositado se expanda e se deforme, causando esse efeito muito característico. Assim como essa temperatura elevada da plataforma, também pode ocasionar o amolecimento das primeiras camadas fazendo com que a peça ceda.

A solução para esses defeitos, são primeiramente, a realização de um nivelamento adequado da plataforma de impressão em relação ao bico extrusor. Na FIGURA 42 vemos um exemplo de como deve parecer a primeira camada sendo depositada. A altura de extrusão da primeira camada do bico irá variar de acordo com o diâmetro do bico sendo utilizado e altura de camada desejada.

FIGURA 42 - TIPOS DE NIVELAMENTO DE BICO EXTRUSOR



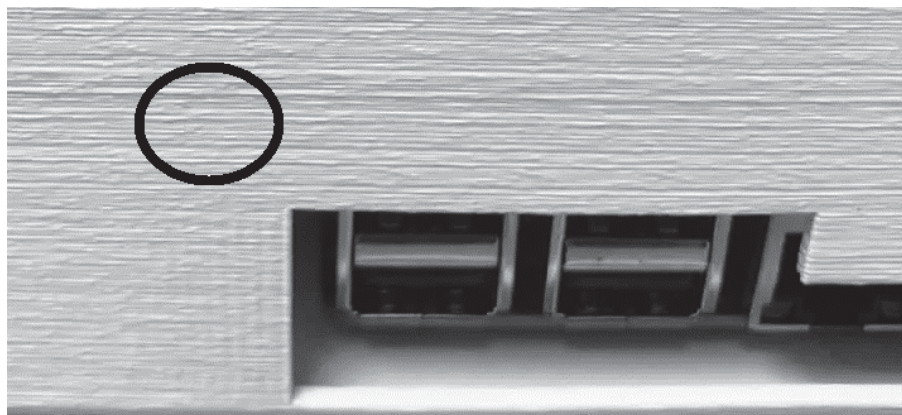
FONTE: Adaptado BITFAB, (2021).

Também é necessário a verificação da temperatura da plataforma de impressão, pois se estiver muito alta, pode ser a principal fonte causadora deste defeito.

2.2.9.7 Ondulações

O problema de ondulações na peça, normalmente é mais visível na camada externa da peça. Na FIGURA 43, em destaque, temos um exemplo de como esse defeito se apresenta.

FIGURA 43 - ONDULAÇÕES



FONTE: Adaptado BITFAB, (2021).

A ondulação, além de causar uma inconformidade e defeito visual, também pode afetar a resistência da peça, pois os filamentos não estão sendo depositados exatamente uns sobre os outros como deveriam. E isso pode gerar uma falta de adesão entre eles

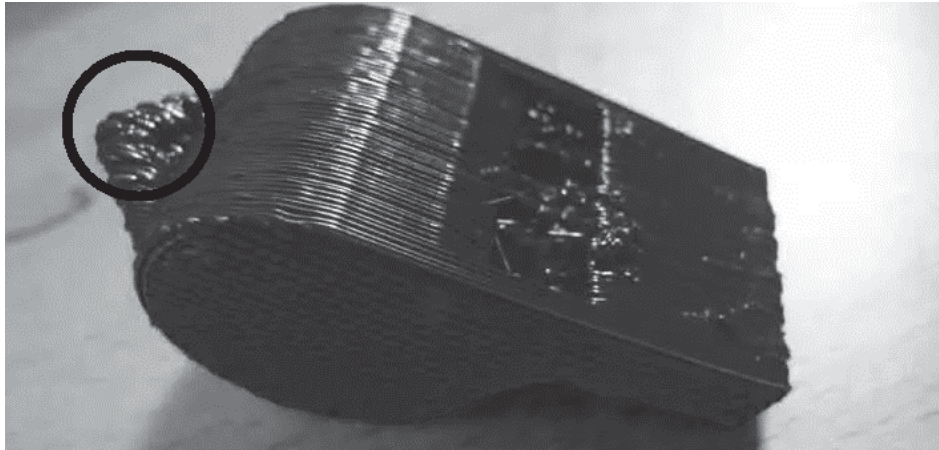
Esse erro pode ser causado por dois problemas, a vibração e a velocidade de impressão. É necessário garantir que a impressora 3D esteja bem apoiada e sem vibrações, e que todas as peças de movimentação estejam bem presas e posicionadas. As vibrações podem ser amplificadas devido a manutenções malfeitas, rolamentos lineares desgastados, a possibilidade dos movimentos de aceleração, desaceleração do cabeçote induzirem uma vibração e ressonância no local de apoio, como uma mesa solta. Também é necessário lubrificar as guias e fusos adequadamente (BITFAB 2021).

As ondulações também podem ser originadas de impressões 3D muito rápidas. Uma extrusão muito veloz, aliada a uma mudança de direção repentina do bico, pode ocasionar esse defeito. Caso estiver sendo utilizado uma velocidade de impressão alta, deve se considerar o aumento do fluxo de alimentação do filamento, assim como uma temperatura de extrusão mais alta (TURKMEN et al., 2018).

2.2.9.8 Extrusão excessiva

A extrusão excessiva ocorre quando a impressora 3D fornece mais material do que o necessário, e o agravamento disso, é o excesso de material na parte externa da peça 3D fabricada. A FIGURA 44 mostra um exemplo desse defeito.

FIGURA 44 – EXTRUSÃO EXCESSIVA



FONTE: Adaptado BITFAB, (2021).

As causas comuns desse problema são as configurações do multiplicador, de extrusão ou fluxo (em inglês *flow* ou *extrusion multiplier*) no *software slicer*, que estão muito altas, para corrigir isso é necessário acessar o *slicer* e alterar a configuração do multiplicador (TURKMEN et al., 2018).

2.2.10. Limitações das peças impressas por FDM

O FDM tem sido amplamente utilizado por seu baixo custo de material e natureza de código aberto, mas é limitado por sua baixa resolução de impressão e, relativamente, lenta velocidade de fabricação.

As peças fabricadas por esse processo, devido a sua natureza de camadas, possuem um comportamento físico anisotrópico, e essa característica restringe o seu uso devido a sua relativa fragilidade em relação às suas contrapartes de plástico injetado isotrópicos (SHILPESH et al., 2018).

2.3 MATERIAIS UTILIZADOS PARA IMPRESSAO FDM

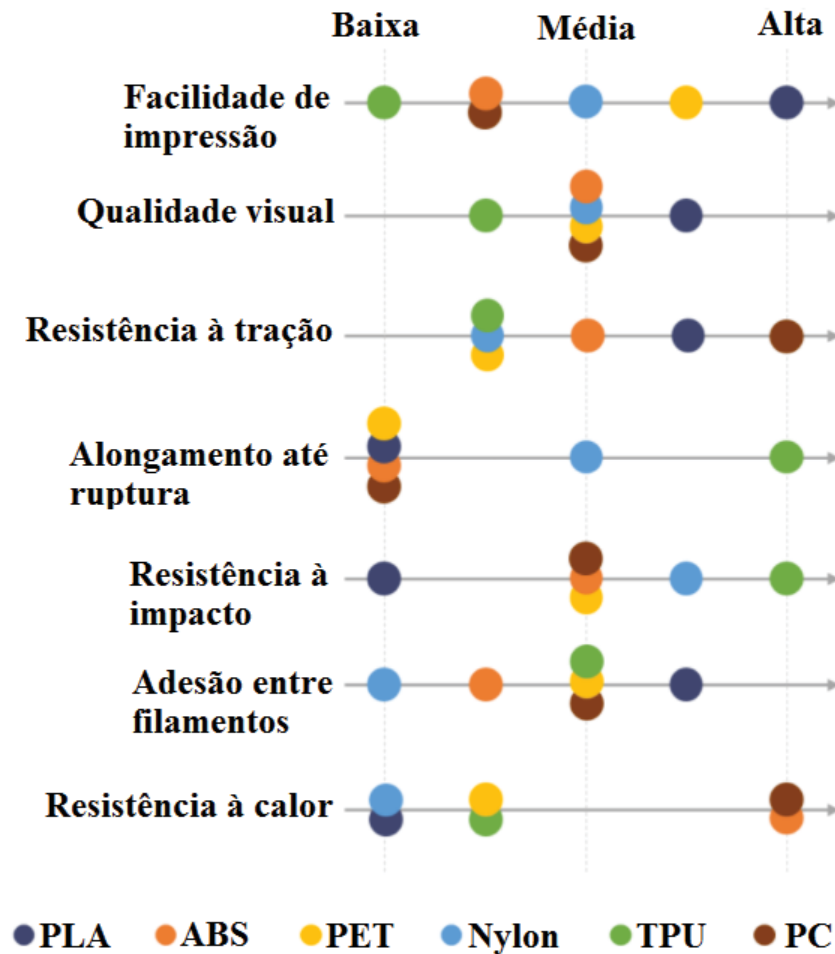
Escolher o tipo certo de material para imprimir um determinado objeto está se tornando cada vez mais difícil, pois no mercado de impressão 3D vê-se o surgimento

de materiais radicalmente novos. Na impressão 3D FDM, o PLA e ABS têm sido historicamente os dois principais polímeros usados, mas seu domínio inicial foi fortuito, portanto, não deve haver nenhum obstáculo para outros polímeros desempenharem um papel fundamental no futuro do FDM (SWETHAM 2017).

Vê-se novos produtos se tornando mais populares, tanto polímeros puros, quanto compostos. Neste tópico, a ênfase é nos principais polímeros puros que existem no mercado hoje: PLA, ABS, PET, Nylon, TPU (Flexível) e PC. Resumimos as principais diferenças entre suas propriedades em uma tabela para que pudesse tomar uma decisão rápida sobre o melhor polímero a ser usado em sua aplicação.

Os materiais para impressão 3D são geralmente classificados em 3 categorias de necessidade: desempenho mecânico, qualidade visual e processo (mais rápido ou mais fácil). Neste caso, essas categorias foram subdivididas para ilustrar de forma mais clara as propriedades dos polímeros. A escolha do material depende das características do que se deseja imprimir, portanto, foi listado na FIGURA 45 as principais características de cada material (excluindo o seu custo e a velocidade de impressão) e um resumo de cada uma das qualidades abordadas.

FIGURA 45 - PRINCIPAIS POLIMEROS E SUAS DIFERENÇAS



FONTE: Adaptado 3D MATTER, (2021).

- Facilidade de impressão: Quão fácil é imprimir um material de adesão com a plataforma, velocidade máxima de impressão, frequência de impressões com falha, precisão de fluxo, facilidade de alimentação na impressora e etc.
- Qualidade visual: A aparência do objeto acabado. Rugosidade superficial e ausência de defeitos de impressão.
- Tensão máxima: O objeto pode sofrer antes de quebrar ao ser tracionado.
- Alongamento na ruptura: Comprimento máximo atingido pelo objeto antes de quebrar.

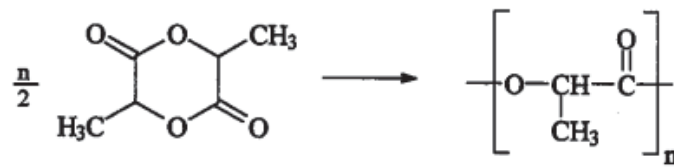
- Resistência ao impacto: Energia necessária para quebrar o objeto com um impacto repentino. Neste caso, observa-se que o polímero PLA puro apresenta baixo alongamento quando comparado a outros polímeros usados para impressão.
- Adesão entre filamentos: Quão boa é a adesão entre os filamentos do material. Está ligada à “isotropia” (uniformidade em todas as direções), quanto melhor a adesão da camada, mais isotrópico será o objeto.
- Resistência ao calor: Temperatura máxima que o objeto pode sustentar antes de amolecer e deformar.

2.3.2 Ácido Polilático (*PLA*)

O ácido polilático é um polímero, que são grandes moléculas que apresentam unidades que se repetem, chamadas monômeros. Tais moléculas podem ser encontradas na natureza ou produzidas em laboratório, por meio de reações de polimerização. Os polímeros podem ser divididos em termoplásticos, termoendurecíveis (termofixos) e elastômeros (borrachas) (TSUJI 2007).

O Ácido Polilático (*PLA*) é um polímero orgânico constituído por moléculas de ácido láctico, que é obtido a partir de recursos renováveis. O ácido láctico é uma molécula que pode ser sintetizada de modo sintético ou biológico, conforme a FIGURA 46. O ácido láctico que é utilizado na sintetização do *PLA* tem sua origem em fontes naturais renováveis que contenham amido ou açúcar, como milho, beterraba, batata, trigo e cana-de-açúcar (QUEIROZ, 2000).

FIGURA 46 - FÓRMULA QUÍMICA DA POLIMERIZAÇÃO DO ÁCIDO LÁCTICO



FONTE: Queiroz, (2000).

O *PLA* apresenta propriedades mecânicas similares às dos polímeros com origem em fontes fósseis, com um elevado módulo de elasticidade, rigidez, biocompatibilidade e boa capacidade de moldagem. (QUEIROZ, 2000).

O ácido polilático (PLA) é um biodegradável e bioativo poliéster alifático termoplástico, derivado de biomassa renovável, normalmente a partir de amido vegetal fermentado, como milho, polpa de mandioca, cana ou beterraba sacarina (QUEIROZ, 2000). A principal vantagem do PLA é talvez, o baixo nível de encolhimento e a fusão relativamente baixa de temperatura. O primeiro leva a um nível mínimo de resíduos e tensões nas peças impressas, resultando na ausência de deformação e delaminação, e o último leva a maior produtividade do processo de impressão (EYNDE et al., 2017). Algumas outras vantagens decisivas na escolha do PLA como material para esse trabalho foram:

- Fácil deposição: Como o PLA é extrudado a uma temperatura relativamente baixa e os filamentos são bem ducteis, a impressão com PLA é das mais simples disponíveis.
- Barato e de fácil acesso: Por ser um dos materiais mais comuns em impressões 3D, há uma grande variedade de fabricantes facilitando a compra do material a preços competitivos.
- Sustentabilidade: Como o PLA tem origem em elementos naturais de biomassa é considerado mais sustentável que outros com base em petróleo. Na prática esse material, após impresso é considerado degradável (e não biodegradável), pois leva muito tempo até se decompor naturalmente (TSUJI, 2007)
- Bem aceito pelas impressoras FDM: Devido às características, parâmetros de impressão e alta disseminação do uso desse

filamento, é um material que pode ser utilizado em praticamente todas as impressoras de FDM.

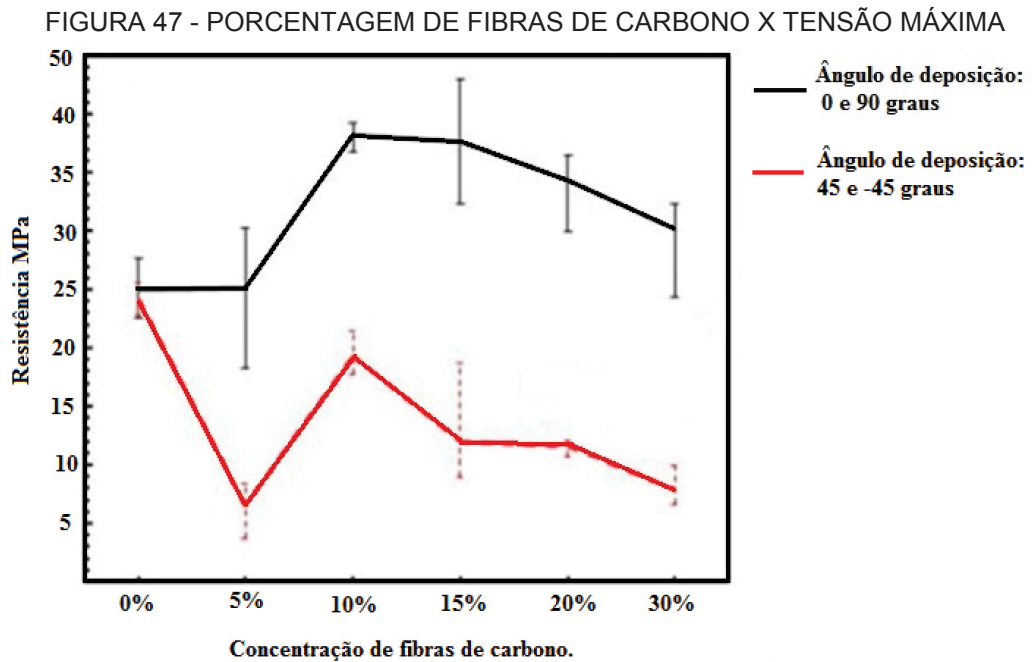
- Não é necessário plataforma de impressão enclausurada: Com uma temperatura de impressão mais baixa e pouca deformação térmica, as impressões de PLA ficam muito boas em plataformas aquecidas abertas. Não sendo necessário um ambiente fechado, como para imprimir em ABS.

- Possibilidade de melhoras suas propriedades com aditivos: Devido a estrutura molecular amorfa do PLA, ele se torna uma boa matriz para adição de aditivos reforçantes como fibras, melhorando a resistência mecânica do filamento e por consequência da peça final.

- Não emite gases ou cheiro ao ser impresso: Alguns outros polímeros de origem do petróleo ou sintéticos, liberam gases ao serem fundidos e extrudados, as vezes sendo necessário uma plataforma enclausurada para conter os gases. O PLA não libera gases desse tipo ao ser impresso.

2.3.3 PLA com fibra de carbono.

De acordo com Hüseyin Kürşad (2019), a adição de fibras no filamento que será utilizado para produzir uma peça impressa em 3D pela tecnologia FDM, aumenta em até 33% a resistência à tração final da peça produzida, conforme FIGURA 47.



FONTE: Adaptado, HÜSEYİN KÜRŞAD, (2019).

Para a fibra de carbono a concentração ideal visando a resistência à tração foi de 10%, porém o maior valor encontrado foi numa concentração de 15% (considerando o maior valor dentro da variabilidade). Após essa concentração são observados defeitos no material ocasionados pela alta quantidade de fibras e baixa aderência entre filamentos (HÜSEYİN Kürşad et al., 2019).

Uma desvantagem quando há um aumento muito grande das fibras no material que irá compor o filamento, é a diminuição do coeficiente de fundição do filamento, e consequente diminuição da adesão entre as camadas da peça final (HÜSEYİN Kürşad et al., 2019). Por esse motivo, a quantidade e o comprimento das fibras que serão adicionadas ao material do filamento devem ser estudadas com atenção para cada aplicação.

A altíssima temperatura de fusão das fibras de carbono, significa que essas fibras não serão fundidas no processo de FDM, que utiliza temperaturas na faixa de 200C°. Quando uma fibra se encontra na camada externa do filamento fundido no momento em que está sendo depositado, a área de contato da fibra com o filamento que havia sido previamente depositado, tem um baixo nível de adesão. E por esse motivo, de enfraquecimento da ligação entre filamentos, não se pode adicionar uma quantidade muito grande de fibras ao material sem gerar consequências prejudiciais ao seu comportamento mecânico (HÜSEYİN Kürşad et al., 2019).

2.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE PEÇAS POLIMÉRICAS FDM

Atualmente, a caracterização de peças obtidas por tecnologias de manufatura aditiva é um campo de pesquisa muito prolífico. Este fato é uma consequência, não apenas do aumento significativo da presença e importância das tecnologias aditivas em uma ampla variedade de indústrias, mas também se deve à falta de padronização desse método.

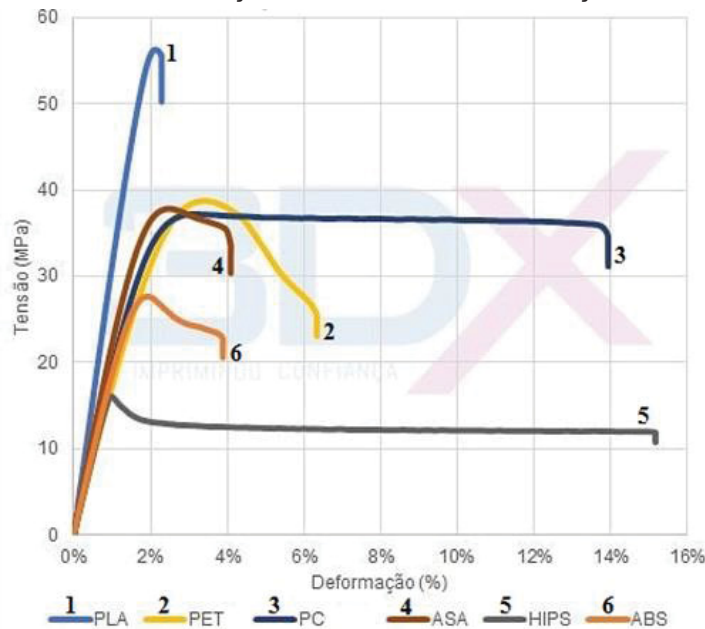
Na revisão feita por Popescu et al., (2018) sobre normas que regem esses testes, foi feita uma demanda para que fossem desenvolvidos padrões específicos para testes em peças produzidas por *FDM*, incluindo a definição de parâmetros de impressão; como espessura da camada, perímetros, temperatura, velocidade e ângulo de varredura. Contudo, os padrões internacionais disponíveis a serem aplicados para testes de tração atualmente são: ISO 527-2 e ASTM D638-14, mas, em ambos esses casos, as diretrizes fornecidas respondem às características que foram desenvolvidas para peças vindas de injeção ou moldagem plástica, que representam um contexto muito diferente. Ao contrário da continuidade e isotropia dos plásticos injetados, a estrutura de camada por camada das peças obtidas por fabricação aditiva é descontínua e anisotrópica. Portanto, a natureza polimérica do material é a única característica comum para ambas as tecnologias (PANES et al., 2018).

As normas nacionais devem seguir as diretrizes das internacionais e atuar de forma complementar com fontes de informação confiáveis, para orientar pesquisadores e profissionais em tarefas específicas aplicadas. Neste caso, como a realização de testes mecânicos para fins de caracterização mecânica de peças obtidas por fabricação aditiva. Portanto, essa seleção implica em diferentes maneiras de entender o material, embora como em todos os casos mencionados anteriormente, o polímero usado possa ser o mesmo, o comportamento da peça é totalmente distinto, pois isso é altamente condicionado pela morfologia interna dessas partes, tradicionalmente entendidas apenas como sólidas.

2.4.1 Resistência à tração dos polímeros

Ensaio de tração realizados em diferentes filamentos utilizados para a impressão 3D, conforme a GRÁFICO 1, indicam que o material que apresenta a maior resistência à tração é o Ácido Polilático (*PLA*), além das vantagens da sustentabilidade por ser um material degradável e reciclável, pela sua facilidade de deposição e por ele não requer condições especiais de impressão. Nota-se que apesar do PLA ter a maior resistência à tração, também é um material bem frágil.

GRÁFICO 1 - ENSAIOS DE TRAÇÃO- TENSÃO x DEFORMAÇÃO CONFORME ASTM D638



FONTE: Adaptado. SILVA, (2018).

Em um cenário onde se deseja fabricar uma peça com uma impressora 3D e com materiais de fácil acesso onde a peça necessite ter resistência à tração, o material a ser escolhido deve ser o *PLA* pelas suas ótimas características de impressão e resistência mecânica (SHLIPESH et al., 2018).

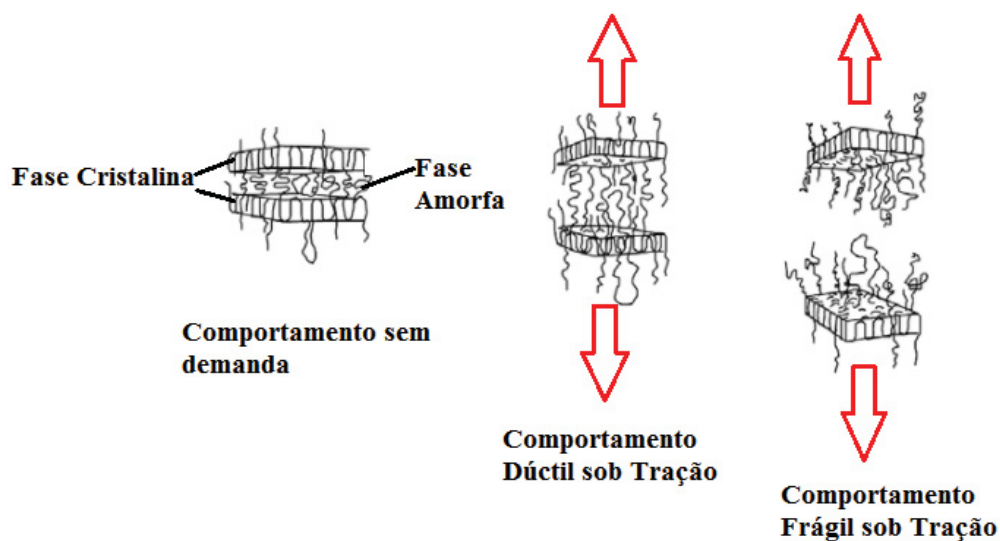
Pode-se notar uma diferença clara no comportamento dúctil/frágil dos filamentos, esses resultados são das características moleculares de cada material. Polímeros com comportamento frágil não apresentam ponto de escoamento, portanto não se

deformam plasticamente. Já polímeros com comportamento dúctil apresentam ponto de escoamento nítido e deformam-se plasticamente.

Em plásticos amorfos, termoplásticos e termofixos, as cadeias moleculares não se desenrolam ao serem tensionadas, e esse material resiste à deformação. A ruptura ocorre com pequena ou nenhuma deformação. O PLA é um polímero que pode ser amorfo, semi-cristalino ou altamente cristalino com uma temperatura de transição vítrea de 60°C e ponto de fusão entre 130-230°C (AGRAWAL et al., 2008).

A FIGURA 48 mostra um exemplo do comportamento amorfo-cristalino que ocorre em polímeros. Com a parte cristalina sendo mais rígida e com comportamento mais frágil, e a amorfa sendo a parte que proporciona uma característica dúctil.

FIGURA 48 - ESTRUTURA LAMELAR POLIMÉRICA

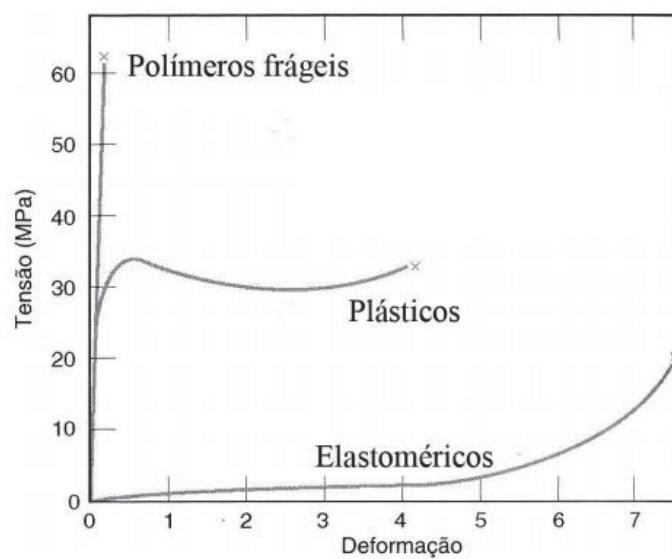


FONTE: Adaptado. HSUAN, (2000).

Em materiais semicristalinos, a parte amorfa do material se desenrola ao ser tracionada gerando uma deformação elástica. Esse material resiste à deformação até que haja a ruptura de planos da estrutura, nesse momento ocorre o início da deformação plástica. Esse material uma grande capacidade de deformação até romper (RUCHERT 2019).

No GRÁFICO 2 temos um exemplo do comportamento de polímeros frágeis, plásticos e elastômeros. Pode se observar um comportamento distinto, como nos polímeros com comportamento frágil, que não apresentam ponto de escoamento e que não se deformam plasticamente. Assim como os polímeros com comportamento dúctil, que apresentam um ponto claro de escoamento e se deformam plasticamente até a ruptura. E os materiais elastoméricos que apresentam grande deformação elástica até a sua ruptura.

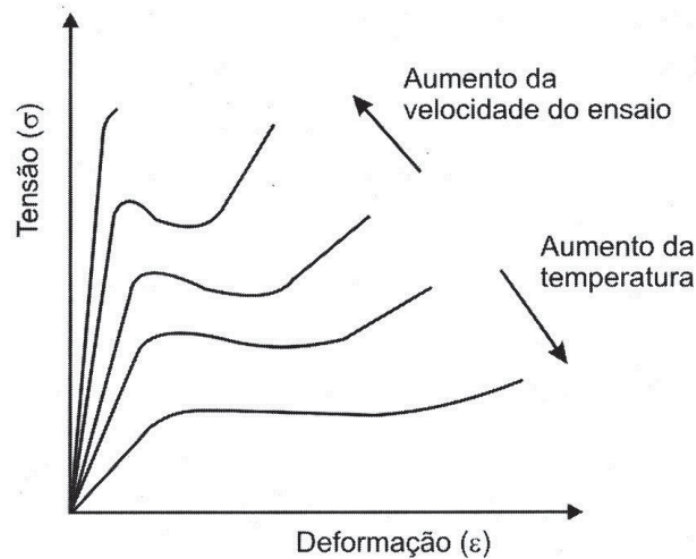
GRÁFICO 2 - COMPORTAMENTO DE POLÍMEROS EM TRAÇÃO



FONTE: RUCHERT, (2019).

Outro fator importante a se levar em conta nos ensaios de tração em polímeros, é a velocidade do ensaio e a temperatura ambiente. Diferentemente dos metais, esse material é bem sensível a essas variações, podendo ocorrer mudanças drásticas no comportamento aparente do material caso esses parâmetros não forem escolhidos corretamente (RUCHERT 2019). No GRÁFICO 3, apresenta-se o exemplo de como esses parâmetros podem alterar o comportamento dúctil/frágil de um material polimérico.

GRÁFICO 3 - COMPORTAMENTO DÚCTIL/FRÁGIL VARIÁVEL



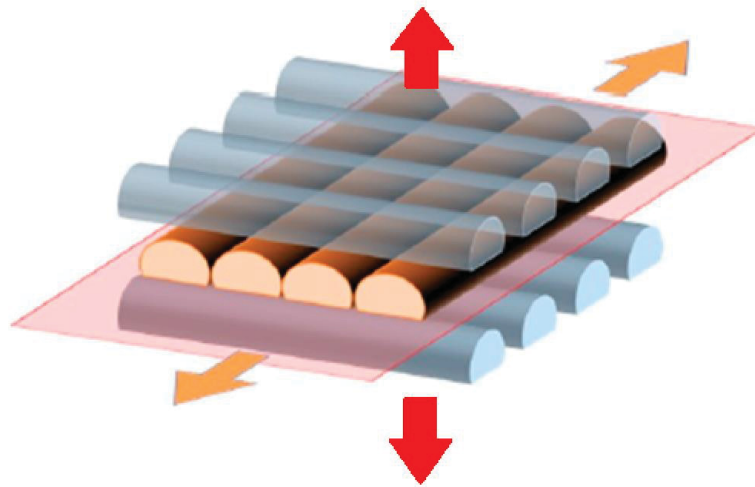
FONTE: RUCHERT, (2019).

A norma ASTM D638-14 estabelece alguns parâmetros para o ensaio em tração de materiais poliméricos, de modo a padronizar esses ensaios. De acordo com a secção transversal da peça sendo ensaiada e tipo (I, II, III, IV) diferentes intervalos de parâmetros são sugeridos para temperatura de ensaio e velocidade do ensaio.

Outra característica a se levar em conta em peças poliméricas, fabricadas pela manufatura aditiva, é a anisotropia que essas peças apresentam em ensaios mecânicos em tração. Como mencionado anteriormente, a resistência da peça, em tração, é muito maior quando a peça é ensaiada no sentido de deposição dos filamentos (ângulo de deposição ou *raster angle*), do que quando a peça é tracionada no sentido perpendicular aos filamentos, ou seja, no sentido das camadas sobrepostas (CALIGNANO et al., 2020).

A FIGURA 49 mostra um exemplo de forças de tração sendo aplicadas entre dois planos de uma peça impressa por FDM. Pode se observar que as forças em laranja, agem no sentido da deposição dos filamentos, e as em vermelho, agem no sentido da deposição da camada. Esse comportamento dependente do sentido da força sendo aplicada gera a anisotropia dessas peças.

FIGURA 49 - TENSÃO ENTRE PLANOS DE MATERIAL ANISOTRÓPICO



FONTE: Adaptado. DOMINGUEZ, (2020).

A norma utilizada nesse trabalho, a ASTM D638-14, não especifica sentidos de deposição para corpos de prova fabricados por FDM. Portanto, foi utilizado o sentido de maior resistência, 0 graus de ângulo de deposição em relação ao eixo X da impressora FDM.

2.4.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste em aplicar uma força uniaxial no material, tendendo-o a alongá-lo até o momento de sua fratura (ASTM 2014). O ensaio é realizado em um corpo de prova circular ou retangular de dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados e reproduzidos.

O corpo de prova é fixado em uma máquina universal de ensaios que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas os esforços e deformações e correspondentes. Os esforços ou cargas, e deformações são mensurados na própria máquina e o ensaio ocorre até a ruptura do material. Os dados que se buscam encontrar nesse ensaio, conforme ASTM, são:

- Módulo de tensão máxima. Esse é o resultado principal e corresponde à tensão máxima (σ_p) resistida pelo corpo de prova, em relação a área de seção transversal (A_o). A equação 1 é a utilizada.

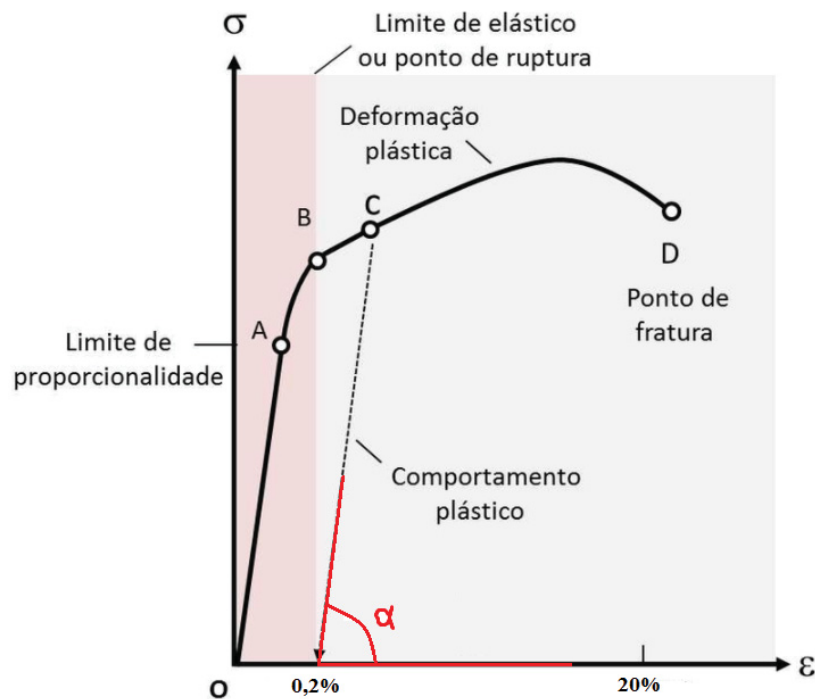
$$\sigma_p = \frac{F_{max}}{A_o} \quad (1)$$

- Tensão de ruptura. Esse valor se refere à tensão (σ_q) medida no momento em que há a ruptura do corpo de prova, relação a área de seção transversal (A_o). E a equação 2 é a que foi utilizada.

$$i. \quad \sigma_q = \frac{F_{quebra}}{A_o} \quad (2)$$

- Limite de escoamento. Esse dado é importante para se saber as características de deformação elástica e plástica. O valor encontrado no gráfico Tensão x Deformação corresponde ao momento onde se inicia a deformação plástica. Pode-se ser visto na FIGURA 50 um exemplo do ponto de escoamento do material, que corresponde ao ponto 'C'. Esse ponto é determinado traçando uma reta paralela a deformação elástica com $\varepsilon = 0,002$ de deformação.

FIGURA 50 - LIMITE DE ESCOAMENTO DE POLÍMEROS EM ENSAIOS TRAÇÃO



FONTE: Adaptado de ALIGNANO, (2020).

- Alongamento. O alongamento total da peça (ε_t) traz informações importantes sobre a ductilidade da peça. Na FIGURA, esse ponto é determinado pelo ponto 'D' no gráfico. E ΔL e L_0 correspondem ao comprimento final e inicial dos corpos de prova, respectivamente.

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (3)$$

- Módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade ou Young (E) dá uma boa ideia do comportamento da peça no regime elástico. Os diferentes tipos de preenchimento afetam esse valor. E ele pode ser calculado pelo ângulo (α) formado entre a reta de deformação (ε) elástica e o eixo X, como pode ser visto na FIGURA 51 acima. As fórmulas 4 e 5 determinam esse valor:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (4)$$

$$tg(\alpha) = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (5)$$

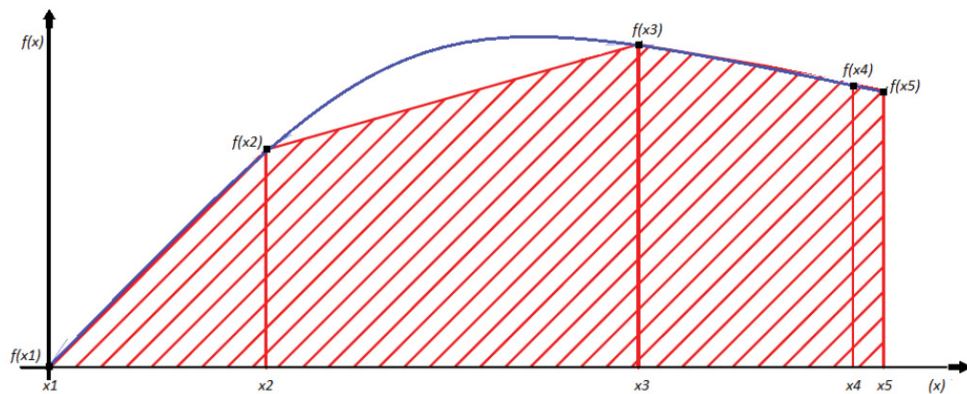
Alguns dos valores necessários para o cálculo foram extraídos automaticamente para máquina de ensaio de tração e disponibilizados, e outros valores só foram obtidos pelo uso de fórmulas e interpretação dos gráficos resultantes.

2.4.3 Tenacidade

A tenacidade corresponde a capacidade da peça de absorver energia e se deformar plasticamente sem romper. Segundo Callister (2000), a tenacidade à fratura é uma propriedade que é a medida da resistência à fratura frágil de um material quando este já tiver uma trinca. E ela corresponde a área abaixo da curva de Tensão x Deformação.

Para calcular o módulo de tenacidade pode ser utilizado uma fórmula numérica aproximada da engenharia, chamada Regra do Trapézio. Para o cálculo do módulo de tenacidade, dado pela área abaixo da curva do gráfico Tensão x Deformação, gerado experimentalmente por ensaio de tração, utiliza-se o uma adaptação do método numérico de integração regra do trapézio, denominado regra do trapézio para segmentos desiguais (SERIGHELLI 2016). Esta regra, consiste em aproximar a integral de uma curva, pelas áreas de trapézios descritos sob esta curva, determinados por retas $f(x_1)$ até $f(x_2)$ em um passo ' x_1 ' até ' x_2 ', $f(x_2)$ até $f(x_3)$ em um passo ' x_2 ' até ' x_3 ' e assim sucessivamente como mostra a FIGURA 51. Foram utilizados passos de 0,01%.

FIGURA 51 - CÁLCULO DA TENACIDADE PELA REGRA DOS TRAPÉZIOS



FONTE: SERIGHELLI (2016).

A linha azul é a curva que descreve o comportamento mecânico da amostra, a qual está sendo aplicada a integração, e as regiões hachuradas vermelhas são as áreas dos trapézios sendo calculados. Desta forma o resultado da integral pela regra do trapézio para segmentos desiguais é dado pela equação 6.

$$Tenacidade = h_1 * \frac{f(x_2) + f(x_1)}{2} + h_2 * \frac{f(x_3) + f(x_2)}{2} + \dots + h_n * \frac{f(x_n) + f(x_{n-1})}{2} \quad (6)$$

Onde ' h_1, h_2, \dots, h_n ' são as bases dos trapézios multiplicando suas respectivas alturas médias. Esse método é utilizado para o cálculo da tenacidade no Capítulo 4.

2.5 TRABALHOS CORRELATOS

A seguir foi feita uma breve revisão de alguns trabalhos similares ao que foi desenvolvido nessa dissertação. Estes artigos foram levantados durante a revisão da literatura nas bases Scopus, Science Direct e Google Scholar através do CAPES CAFÉ. Através da criação de uma *string* de busca que retornasse os resultados mais pertinentes esses artigos foram encontrados. Esses trabalhos correlatos trazem vários parâmetros que foram utilizados como base para o desenvolvimento dos experimentos dessa dissertação. Adicionalmente busca-se esclarecer alguns

parâmetros e metodologia, utilizando como referência experiências e artigos desenvolvidos por indivíduos em outras partes do mundo.

2.5.1 “Effect of fused deposition modelling (FDM) process parameters on tensile strength of carbon fibre PLA”

Nesse trabalho desenvolvido por Rao Prasada, Rajiv P., e Navya Geethika do departamento de engenharia mecânica da Universidade de Bhirmavaram na Índia em 2018, é analisado a influência de alguns parâmetros na resistência final da peça. Fabricando corpos de prova e variando a altura de camada e temperatura de impressão, que é feita uma caracterização mecânica da influência de cada parâmetro na resistência final.

Utilizando uma impressora do tipo FDM com plataforma de impressão 200x200x200mm enclausurada do modelo DRONA C300D. Nela são fabricados 27 corpos de prova seguindo o Tipo I da norma ASTM D638-14. O material utilizado é o PLA reforçado com fibra de carbono. Pode-se observar na TABELA 1 um detalhamento de todas as amostras utilizadas.

TABELA 1 - REFORÇO DO PLA, DETALHAMENTO DE AMOSTRAS

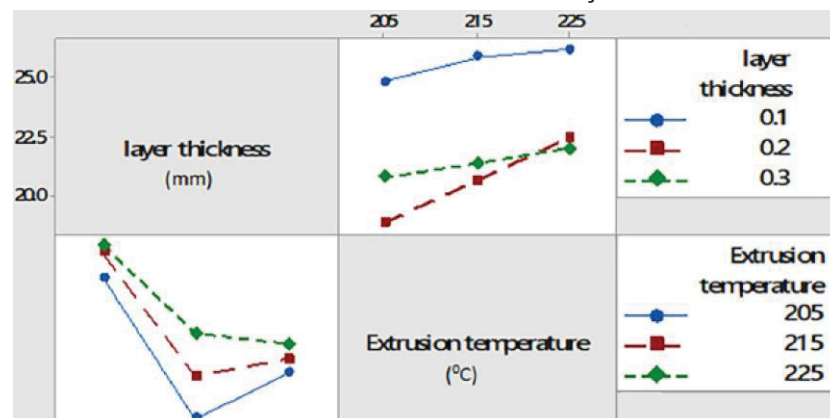
Sample No.	Code	Layer thickness (L) in mm	Extrusion temperature (T) in °C
1	P ₁ T ₁ L ₁	0.1	205
2	P ₁ T ₁ L ₂	0.2	205
3	P ₁ T ₁ L ₃	0.3	205
4	P ₁ T ₂ L ₁	0.1	215
5	P ₁ T ₂ L ₂	0.2	215
6	P ₁ T ₂ L ₃	0.3	215
7	P ₁ T ₃ L ₁	0.1	225
8	P ₁ T ₃ L ₂	0.2	225
9	P ₁ T ₃ L ₃	0.3	225
10	P ₂ T ₁ L ₁	0.1	205
11	P ₂ T ₁ L ₂	0.2	205
12	P ₂ T ₁ L ₃	0.3	205
13	P ₂ T ₂ L ₁	0.1	215
14	P ₂ T ₂ L ₂	0.2	215
15	P ₂ T ₂ L ₃	0.3	215
16	P ₂ T ₃ L ₁	0.1	225
17	P ₂ T ₃ L ₂	0.2	225
18	P ₂ T ₃ L ₃	0.3	225
19	P ₃ T ₁ L ₁	0.1	205
20	P ₃ T ₁ L ₂	0.2	205
21	P ₃ T ₁ L ₃	0.3	205
22	P ₃ T ₂ L ₁	0.1	215
23	P ₃ T ₂ L ₂	0.2	215
24	P ₃ T ₂ L ₃	0.3	215
25	P ₃ T ₃ L ₁	0.1	225
26	P ₃ T ₃ L ₂	0.2	225
27	P ₃ T ₃ L ₃	0.3	225

FONTE: RAO, (2018).

Após a fabricação dos corpos de prova, eles foram submetidos a um ensaio de tração em uma máquina universal do modelo HEICO/HLC 639 com capacidade de 50kN e precisão de 0,5%.

Os resultados dos testes são apresentados graficamente na FIGURA 52, onde pode-se notar que os melhores resultados foram obtidos utilizando uma altura de camada de 0,1mm, e temperatura de extrusão de 225 ° Celsius.

FIGURA 52 - ENSAIO DE TRAÇÃO



FONTE: RAO, (2018).

Os autores destacam que há uma grande influência desses parâmetros na resistência final da peça, está é a importância de escolher adequadamente esses valores visando a melhor resistência possível da peça.

Em seguida os autores utilizaram uma análise estatística de ANOVA, para determinar a contribuição de cada um dos parâmetros com o resultado final. A TABELA 2 mostra-se os resultados por eles obtidos.

TABELA 2 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ANOVA

Source	Degree of Freedom	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution
X1	2	136.517	68.258	16.06	0.000	54.31%
X2	2	19.984	9.992	2.35	0.012	7.95%
X3	2	9.867	4.934	1.16	0.033	3.93%
Error	20	85.005	4.250			33.82%
Total	26					

FONTE: RAO, (2018).

Pode-se notar que os parâmetros X1 e X2, a altura de camada e temperatura de extrusão respectivamente, são os parâmetros de maior influência na resistência final da peça.

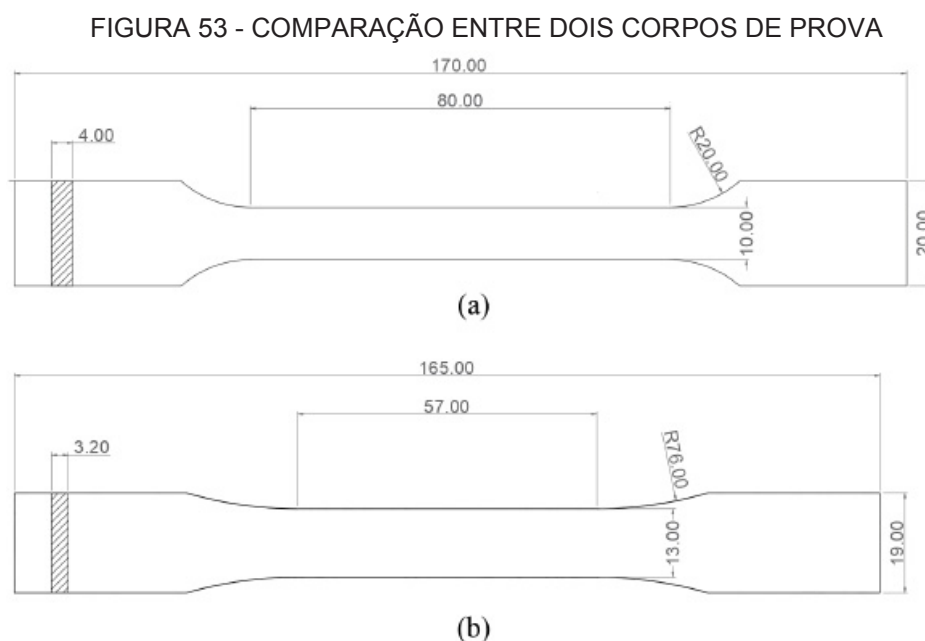
Como resultado os autores determinam que para a impressão do PLA com fibra de carbono, a melhor altura de camada é de 0,1mm e a temperatura de extrusão de 225° Celsius.

2.5.2 “Considerations on the Applicability of Test Methods for Mechanical Characterization of Materials Manufactured by FDM.”

Esse trabalho foi desenvolvido por Amabel Domínguez, Juan Claver, Ana Camacho e Miguel Sebastián do departamento de engenharia de manufatura da UNED em Madrid, Espanha em 2019. E nele, é analisado a aplicabilidade das normas e métodos utilizados para ensaiar materiais poliméricos tradicionais, quando ensaiando materiais poliméricos fabricados pela manufatura aditiva.

Eles então realizaram a fabricação de 20 corpos de prova, 10 deles foram ensaiados conforme a ISO 527–2 e os outros 10, conforme a ASTM D638–14. O material utilizado para impressão dos corpos de prova foi o ABS, e foram impressos com 100% de preenchimento. A impressora utilizada por eles foi uma BCN3D Sigma – Marlin com plataforma de impressão aberta de 210x297x210mm.

O formato do corpo de prova é levemente diferente um do outro, devido a cada um seguir uma norma distinta. Na FIGURA 53, mostrada por eles podemos ver uma comparação entre os dois corpos de prova.



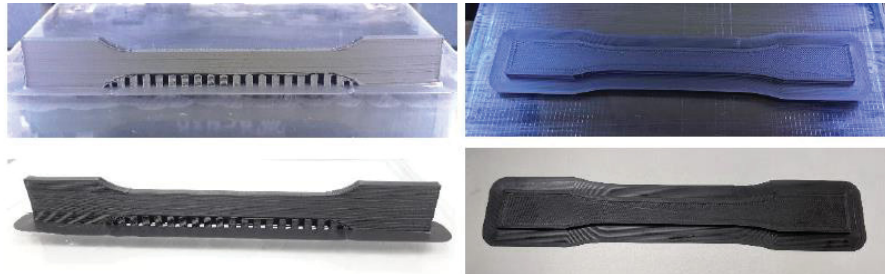
FONTE: DOMINGUEZ, (2019).

O corpo de prova (a) corresponde ao modelo 1A determinado pela: UNE116005 (baseada na ISO 527-2). E o corpo de prova (b) corresponde ao modelo Tipo I, determinado pela ASTM D638–14. Pode se notar que, apesar de terem um formato similar, há uma diferença de 3,9% na seção transversal entre as duas peças, sendo a menor secção transversal a da UNE116005.

Os corpos de prova foram então, impressos em uma impressora FDM em duas orientações conforme mostra a FIGURA 54. Sendo que na orientação 1, no lado esquerdo, os corpos foram impressos lateralmente e na orientação 2, no lado direito, foram impressos horizontalmente. Também é possível observar a necessidade do uso

de material suporte de modo a alcançar a geometria intencionada do corpo de prova na orientação 1.

FIGURA 54 - PEÇAS IMPRESSAS EM IMPRESSORA FDM



FONTE: DOMINGUEZ, (2019).

Os corpos de prova fabricados conforme cada norma e orientação, foram então organizados na TABELA 3. Onde pode se notar que o experimento é dividido entre 4 ensaios com 5 corpos de prova cada ensaio. Sendo 5 corpos de prova em cada uma das duas normas e em cada uma das duas orientações.

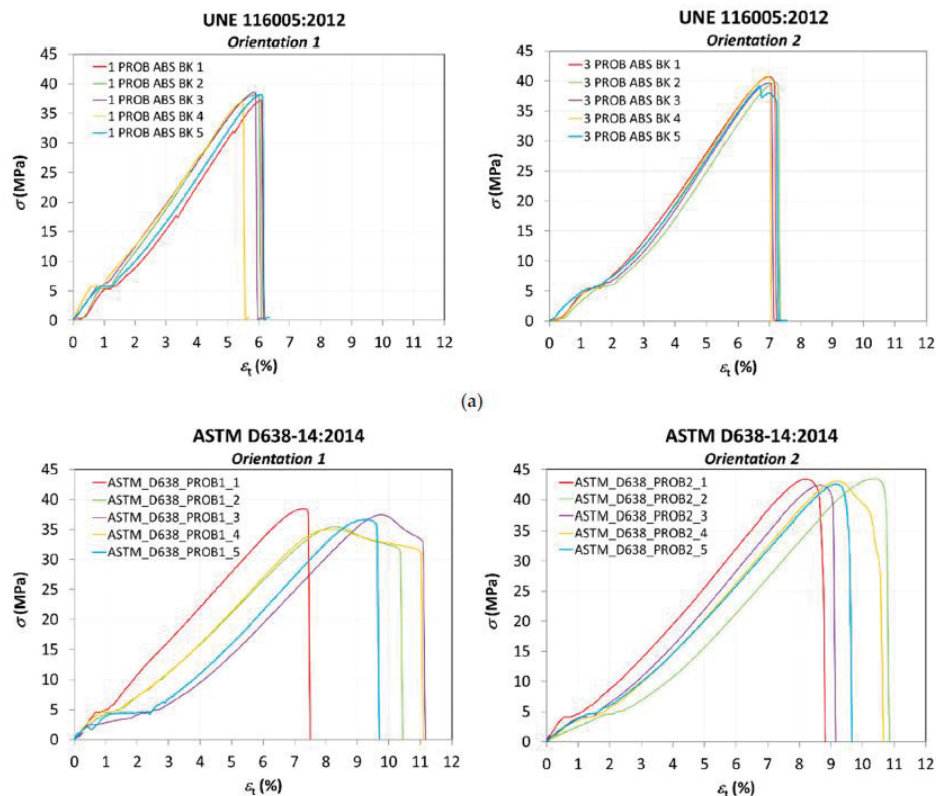
TABELA 3 - EXPERIMENTOS NOS CORPOS DE PROVA

Standard	Orientation 1	Orientation 2
UNE 116005:2012	1 PROB ABS BK 1	3 PROB ABS BK 1
	1 PROB ABS BK 2	3 PROB ABS BK 2
	1 PROB ABS BK 3	3 PROB ABS BK 3
	1 PROB ABS BK 4	3 PROB ABS BK 4
	1 PROB ABS BK 5	3 PROB ABS BK 5
ASTM D638-14:2014	ASTM_D638_PROB1_1	ASTM_D638_PROB2_1
	ASTM_D638_PROB1_2	ASTM_D638_PROB2_2
	ASTM_D638_PROB1_3	ASTM_D638_PROB2_3
	ASTM_D638_PROB1_4	ASTM_D638_PROB2_4
	ASTM_D638_PROB1_5	ASTM_D638_PROB2_5

FONTE: DOMINGUEZ, (2019).

Após os ensaios de tração, foi determinado que as amostras da norma UNE 116005, atingiram um desvio padrão menor, porém os da ASTM atingiram uma média de valores mais alta. Conforme mostrado pelos autores na FIGURA 55, também pode se perceber que a orientação 2, foi a que ofereceu melhores resultados finais.

FIGURA 55 - COMPARATIVO



FONTE: DOMINGUEZ, (2019).

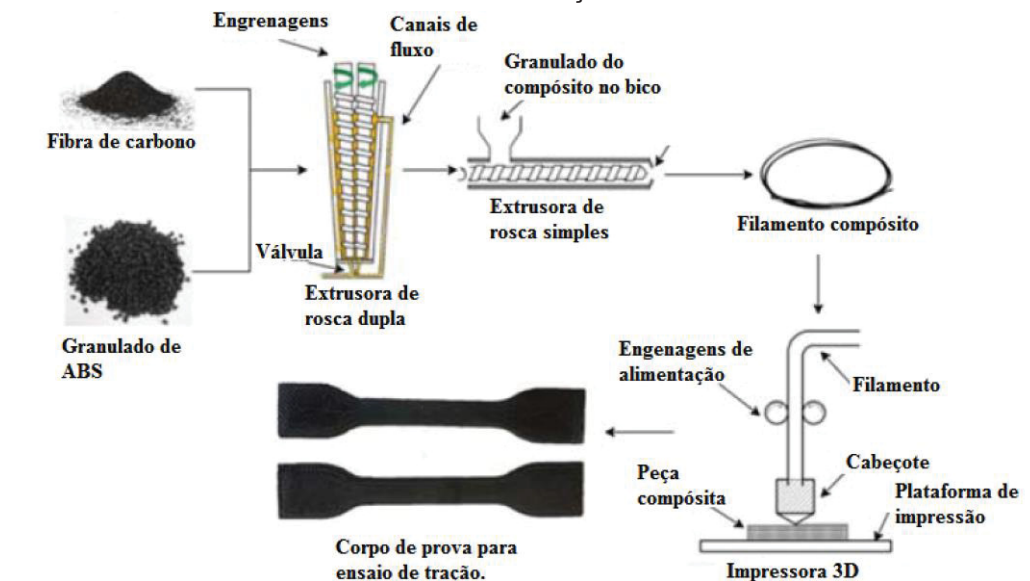
Esse trabalho trouxe informações importantes sobre a orientação de impressão e as normas que são aplicadas a esses ensaios.

2.5.3 “Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties.”

Neste trabalho desenvolvido por Hüseyin Sezer, Oğulcan Eren, Hüseyin Börkl e Veysel Özdemir, é feito um estudo da concentração ideal de fibras de carbono dentro de filamentos de ABS. OS autores são do departamento de engenharia de design industrial da universidade de Grazi em Ankara na Turquia.

Em posse de uma extrusora de filamento, matéria prima ABS e fibras de carbono, são fabricados corpos de prova e ensaiados para resistência à tração. Na FIGURA 56, foi feito um resumo dos materiais e etapas do processo.

FIGURA 56 - ESTUDO DA CONCENTRAÇÃO IDEAL DE FIBRAS DE CARBONO



FONTE: Adaptado de HÜSEYİN, (2019).

Os filamentos foram produzidos com a adição de fibras de 6 mm de comprimento em matriz de ABS, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas das peças impressas FDM.

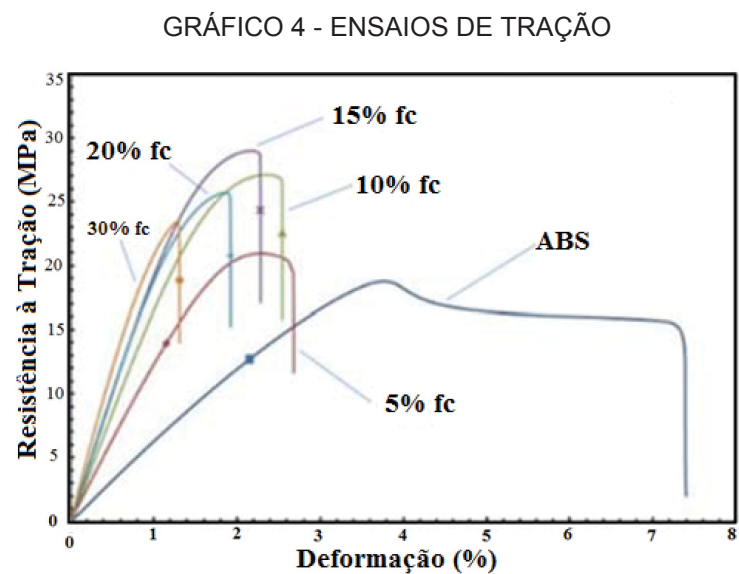
Segundo os autores, as fibras de carbono com 6 mm de comprimento foram misturadas com granulado de ABS usando uma extrusora de rosca dupla. A mistura foi posteriormente processada em uma extrusora de rosca simples para a produção de filamentos padrão de para impressoras 3D comerciais. O filamento de ABS reforçado com fibra de carbono em diferentes porcentagens de concentração, foram usados em uma impressora 3D comercial para produzir corpos de prova de tração padrão, de acordo com a ASTM D412. Na TABELA 4 os autores demonstram as 5 concentrações de fibra de carbono utilizadas para os testes.

TABELA 4 - CONCENTRAÇÕES DE FIBRA DE CARBONO

Número do teste	Fibra de carbono (g)	Granulado de ABS (g)	Concentração
1	0,75	14,25	%5
2	1,5	13,5	%10
3	2,25	12,75	%15
4	3	12	%20
5	4,5	10,5	%30

FONTE: Adaptado de HÜSEYIN, (2019).

Também notaram que a alta concentração de fibras de carbono resulta em porosidade nas peças, isso reduz a sua força em testes de tração. No GRÁFICO 4, a seguir, é mostrado os diferentes resultados dos ensaios de tração em relação a concentração de fibra de carbono em cada peça.



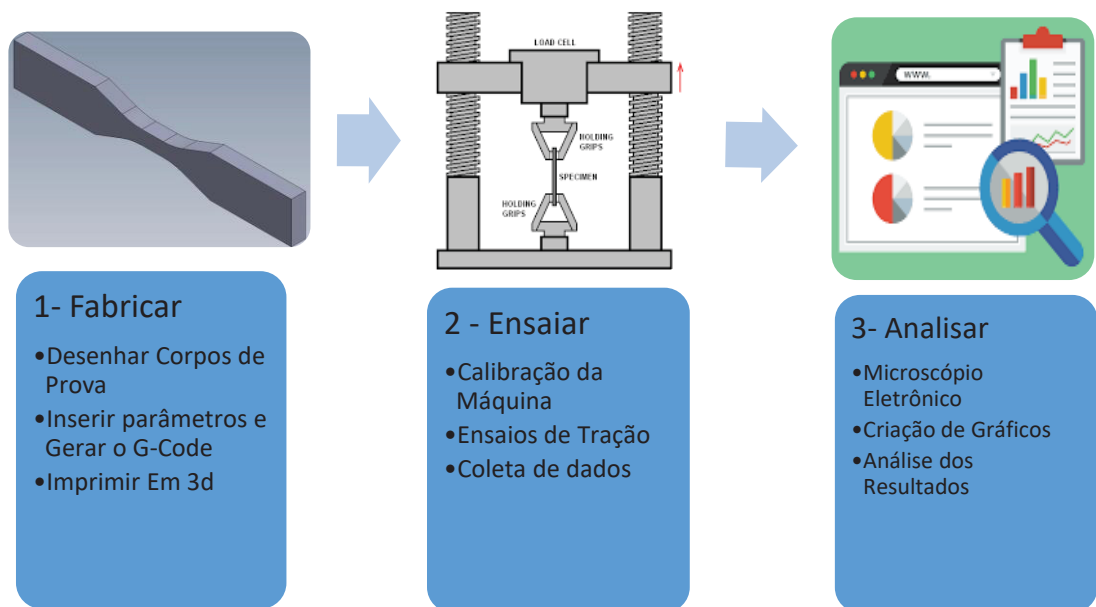
FONTE: Adaptado de HÜSEYIN, (2019).

Segundo os autores, os resultados do teste de tração sugeriram claramente que os espécimes com adição de fibra de carbono são mais fortes do que os espécimes apenas de ABS. Por outro lado, a tenacidade e a ductilidade diminuem com o aumento do teor de fibra de carbono. Concluem que a concentração que apresenta a maior resistência para tração é a de 15%.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A organização prévia e a definição das ações de forma cronológica para trabalhos com experimentos em laboratório são de suma importância. A FIGURA 57 mostra as etapas executadas. Os procedimentos foram divididos em três etapas: fabricar, ensaiar e analisar.

FIGURA 57 - ATIVIDADES DESENVOLVIDAS EM LABORATÓRIO



Fonte: O Autor, (2021).

- Item 1. Fabricação dos corpos de prova. Essa etapa é composta pela modelagem dos corpos de prova em 3D no Solidworks (*Software CAD*), o carregamento dos modelos juntamente com os parâmetros de impressão no software *slicer* do CURA. E, por fim, a impressão 3D de todos os corpos de prova com os respectivos preenchimentos e densidades.

- Item 2. Os ensaios dos corpos de prova. Esta é a etapa em que os corpos de prova impressos serão submetidos a um ensaio de tração, e os dados coletados. É necessário fazer a calibragem da máquina de tração e ensaiar todos os corpos com os parâmetros pré-estabelecidos.

- Item 3 . Análise e composição dos resultados. Nesta etapa foi feita uma análise física com os corpos de prova rompidos e dos dados coletados durante o ensaio. Uma inspeção visual das características do local de rompimento do corpo de prova, auxiliou na caracterização mecânica dos espécimes. A análise de ANOVA com dois fatores foi realizada para determinar a significância da resistência mecânica de cada preenchimento e densidade.

3.1 MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

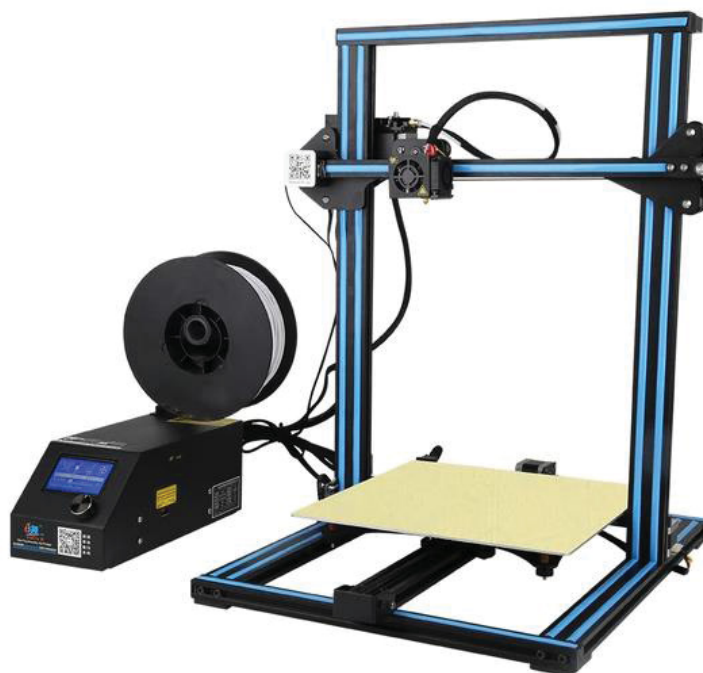
A correta previsão e disponibilidade dos equipamentos necessários para os testes de laboratório são de suma importância em um trabalho de caracterização mecânica. Pois a condição física e utilização desses equipamentos terá grande influência nos resultados e conclusões. Este trabalho utilizou seguintes equipamentos para ser realizado:

- Impressora 3D de FDM.
- Balança de precisão.
- Paquímetro.
- Máquina universal de ensaio de tração.
- Microscópio óptico.

3.1.1 Impressora 3D - Creality CR-10S

Nesse trabalho foi utilizado uma impressora 3D de FDM do modelo Creality CR-10S (FIGURA 58). Esta impressora funciona pelo sistema de deposição de filamentos fundidos, e possui uma plataforma aquecida e de impressão aberta.

FIGURA 58 - IMPRESSORA 3D CREALITY CR-10S



FONTE: TOPINK3D, (2020).

Esta impressora 3D foi disponibilizada pelo laboratório GIMA, e os consumíveis (filamento PLA+FC) foram obtidos com recursos próprios. A TABELA 5 fornece os dados técnicos da impressora utilizada.

TABELA 5 - DADOS TÉCNICOS DA IMPRESSORA 3D

IMPRESSORA 3D FDM: Creality CR-10S		
TAMANHO MÁXIMO DE IMPRESSÃO (mm)	X	300
	Y	300
	Z	400
VELOCIDADE DE IMPRESSÃO	60 - 80mm/s	
VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO	300mm/s	
VELOCIDADE DE ACELERAÇÃO	2500mm/s	
PRECISÃO DE IMPRESSÃO	+-0,1mm	
PRECISÃO DE POSICÃO	Z:0,004mm/XY:0,012mm	
ALTURA DE CAMADA	0,1 - 0,4mm	
POTÊNCIA	250W	
DIÂMETROS DE BICO	0,1 - 0,9mm	
DIÂMETRO DO FILAMENTO	1,75mm	
TEMPERATURA MÁXIMA DA MESA	100°C	
TEMPERATURA MÁXIMA DO BICO	270°C	

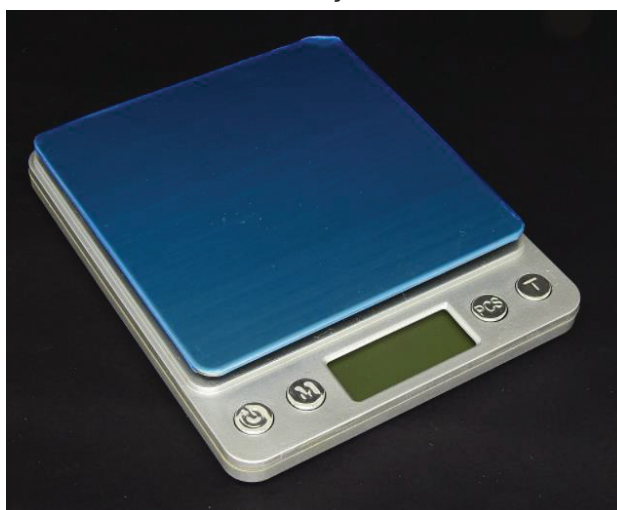
FONTE: Adaptado, TOPINK3D, (2020).

Todos os requisitos e parâmetros necessários para confecção dos corpos de prova foram supridos com essa impressora.

3.1.2 Balança de Precisão

Nesta etapa as amostras foram pesadas em uma balança digital de precisão da marca Diamond. Esse valor foi usado determinar a sua densidade real em relação à planejada. Com base nesses dados foi possível verificar a relação entre a resistência mecânica e peso da peça. A balança usada nos experimentos é apresentada na FIGURA 59.

FIGURA 59 - BALANÇA DE PRECISÃO



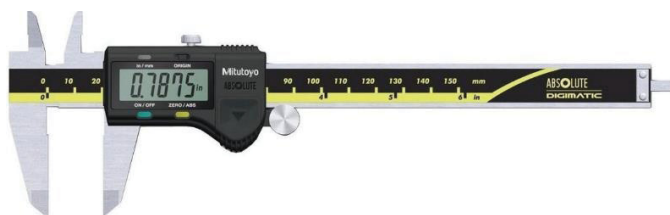
FONTE: O Autor, (2021).

A balança utilizada tem precisão de 0,1g, o que foi considerado suficiente para atender às demandas do trabalho.

3.1.3 Paquímetro

O controle dimensional foi realizado com o uso de um paquímetro Mitutoyo digital 0-150mm com resolução 0,01mm, semelhante ao da FIGURA 60.

FIGURA 60 - PAQUÍMETRO E TRANSFERIDOR



FONTE: MITUTOYO, 2020.

Essa análise foi necessária para verificar que as dimensões externas dos corpos de prova estavam de acordo com os modelos propostos, e que não houveram anomalias durante a sua fabricação.

3.1.4 Máquina Universal para Ensaio de Tração.

O ensaio de tração, é utilizado para conhecer as propriedades e comportamento dos materiais quando submetidos a tal esforço. O corpo de prova é tracionado no seu sentido de maior comprimento até o seu rompimento. Força e alongamento são coletados instantaneamente durante esse processo. O equipamento utilizado para fazer o teste é denominado de Máquina Universal para Ensaio de Tração. A FIGURA 61 traz uma imagem representativa da máquina que foi utilizada.

FIGURA 61 - MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIO DE TRAÇÃO OSWALDO FILIZOLA AME-2kN.



FONTE: OSWALDO FILIZOLA, (2020).

A seguir foi elaborada a TABELA 6 com todos os dados técnicos da máquina universal de ensaios à tração que foi utilizada.

TABELA 6 - DADOS TÉCNICOS MÁQUINA DE ENSAIO

MÁQUINA DE TRAÇÃO: OSWALDO FILIZOLA AME-2kN	
CAPACIDADE	2.000kgf
TIPO	FUSO DE ESFERAS RECIRCULANTES
VELOCIDADE	0,5 a 1.000mm/min
MEDIÇÃO DE FORÇA	CÉLULA DE CARGA CLASSE 1
MEDIÇÃO DESLOCAMENTO	Incorporado RESOLUÇÃO: $\pm 0,001\text{mm}$
FORÇA MÁXIMA PARA TRAÇÃO DE TRAÇÃO COM GARRAS	150kgf
INTERFACE E CONFIGURAÇÕES	DynaView Standard/Pro M,

FONTE: OSWALDO FILIZOLA, (2020).

Todos os requisitos e parâmetros necessários para os ensaios, foram supridos por esse equipamento.

3.1.5 Microscópio Óptico

A microscopia óptica foi realizada com auxílio de um microscópio OLYMPUS BX51 M, no qual está acoplado uma câmera CCD que permite a captura de imagens. As amostras não foram preparadas ou tratadas para análise. A FIGURA 62 mostra esse modelo de microscópio.

FIGURA 62 - MICROSCÓPIO OLYMPUS BX51



FONTE: OLYMPUS, 2021.

Esse microscópio é ideal para a visualização, registro e análise de imagens microscópicas. O seu regime de observação é de luz refletida em campo claro e escuro, a sua ampliação máxima é de 1000x e possui gravação de imagem por uma câmera digital.

3.1.6 Softwares Utilizados

Os *softwares* utilizados para modelagem e impressão de corpos de prova em 3D, são; primeiramente um *software* de CAD, que como explicado anteriormente esse é o programa em que a peça é concebida e desenhada em um ambiente virtual. O programa que foi utilizado para essa modelagem foi o Solidworks versão X64 *Student Edition*. Em seguida foi utilizado o programa de *slicer*, CURA V4.5, que é disponibilizado gratuitamente, e suporta todos os formatos e parâmetros utilizados. Adicionalmente a isso, foi utilizado o Excel para compor e comparar gráficos com os dados provenientes dos ensaios de tração.

3.1.7 Material

O filamento PLA com fibra de carbono que foi utilizado no trabalho foi adquirido localmente da empresa SINTETIZE 3D em Curitiba. Os dados técnicos do filamento são apresentados na sequência:

- Fibras de CARBONO 3mm a 5 mm
- Concentração de fibras de carbono: 15%.
- Espessura: 1,75mm +- 0,005mm
- Intervalo de temperatura de impressão: 190°C a 230°C.
- Intervalo sugerido da temperatura da mesa: 40 – 50 °C.

O Filamento vem em rolos de 800g sem coloração artificial e selados a vácuo. Foram utilizados 1715g de filamento para completar todos os corpos de prova, portanto foram adquiridos 3 rolos, de modo a comportar uma eventual perda de peças. Uma foto do filamento é apresentada na FIGURA 63.

FIGURA 63 - FILAMENTO DE PLA REFORÇADO COM 15% DE FIBRA DE CARBONO



FONTE: SINTETIZE3D, (2021).

O filamento escolhido não possui coloração artificial pois alguns estudos indicam que o pigmento pode afetar a sua resistência mecânica (SWETHAM et al., 2017).

Mais adiante será mostrado os resultados de uma análise microscópica deste filamento, revelando as fibras contidas na matriz, a sua localização e comprimento.

3.2 METODO E DESENVOLVIMENTO

Nesta etapa é explicado os detalhes de desenvolvimento do projeto, fabricação, ensaio dos corpos de prova e análises físicas e numéricas.

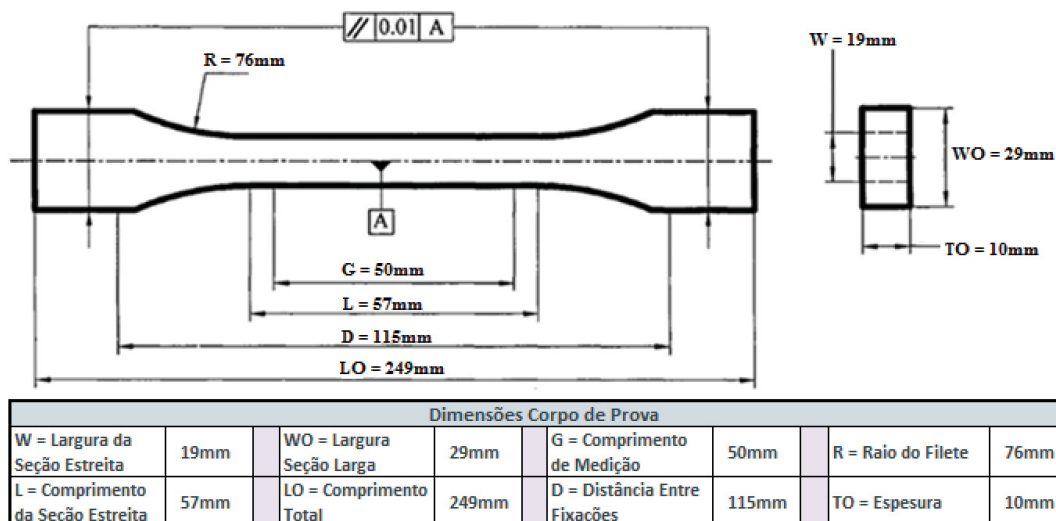
3.2.1 Modelagem e Fabricação dos Corpos de Prova

O dimensional e formato dos corpos de prova seguiram as orientações da norma ASTM D638-14, seguindo o Tipo III. Estes exemplares têm espessura de 10mm, permitindo que a influência dos preenchimentos tenha um efeito significativo na resistência da peça final.

A escolha do tipo de corpo de prova é essencial para garantir o sucesso do experimento, portanto, todas as necessidades inerentes ao ensaio proposto foram

levadas em consideração. A FIGURA 64 apresenta os valores dimensionais do corpo de prova Tipo III obtidos na norma.

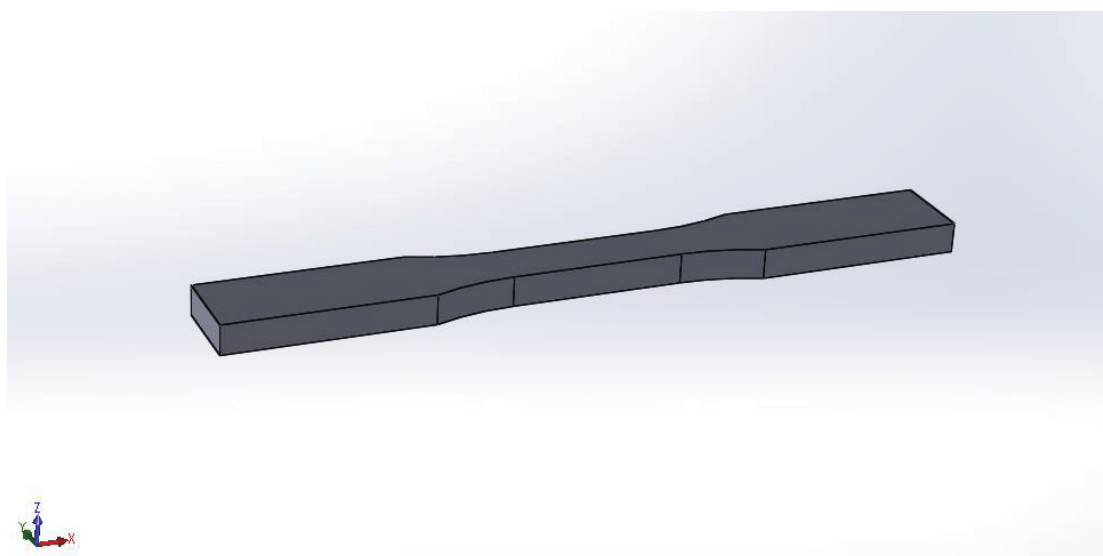
FIGURA 64 - DIMENSÕES FINAIS DO CORPO DE PROVA TIPO III



FONTE: Adaptado da ASTM D638 – 14, (2021).

O corpo de prova com as dimensões conforme Norma foi modelado em 3D no *software* SolidWorks, e o arquivo foi salvo no formato *stereolithography* ou STL. Na FIGURA 65, é mostrado a aparência final do corpo de prova modelado em 3D.

FIGURA 65 - MODELO CORPO DE PROVA EM 3D NO SOLIDWORKS

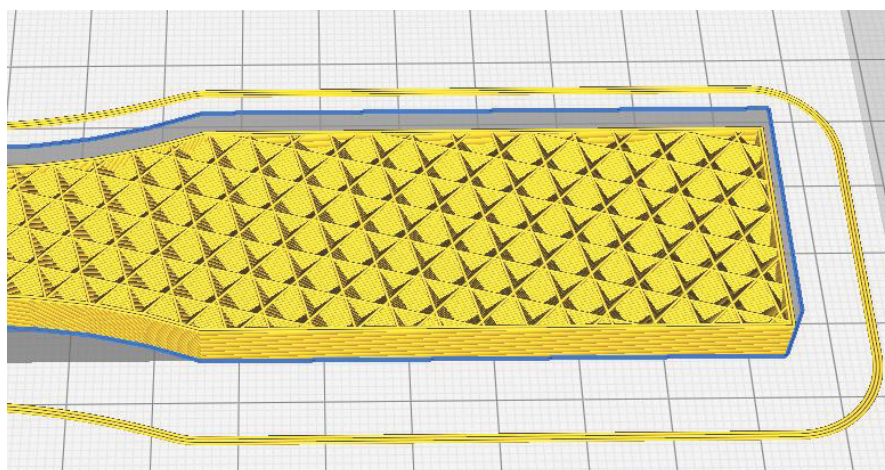


FONTE: O Autor, (2021).

O modelo que foi salvo em STL na sequência foi carregado no *software* CURA para programação dos parâmetros de impressão e processo. Na sequência foi feito o fatiamento dos modelos em cada um dos três tipos de preenchimento, estes preenchimentos foram escolhidos pois são os mais indicados para aplicações estruturais, e são detalhados a seguir:

- Cúbico: este é um padrão 3D de cubos empilhados e inclinados. A FIGURA 66 mostra esse preenchimento cortado em uma secção transversal.

FIGURA 66 - PREENCHIMENTO TIPO CÚBICO

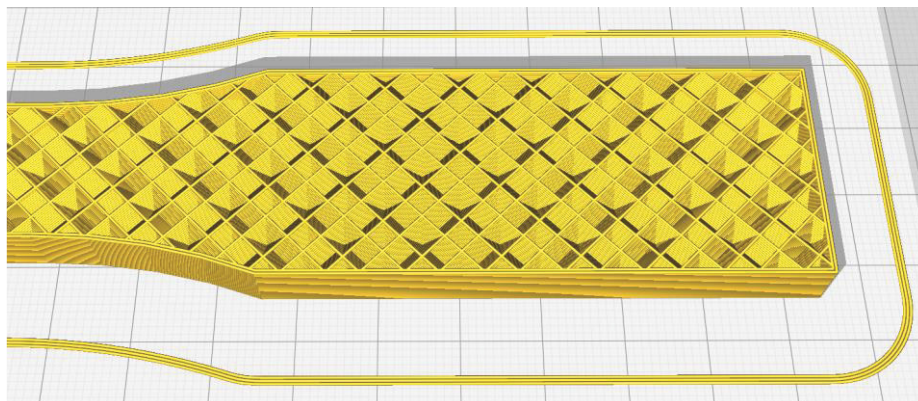


FONTE: O Autor. Utilizando o software CURA (2021).

Nesse preenchimento os cubos não se iniciam com uma face coplanar com o plano da peça, mas sim com uma das pontas do cubo.

- Octeto: Também conhecido como preenchimento tetraédrico, esse padrão empilha formas de pirâmides com base triangular. A FIGURA 67 mostra esse preenchimento cortado em uma secção transversal.

FIGURA 67 - - PREENCHIMENTO TIPO OCTETO

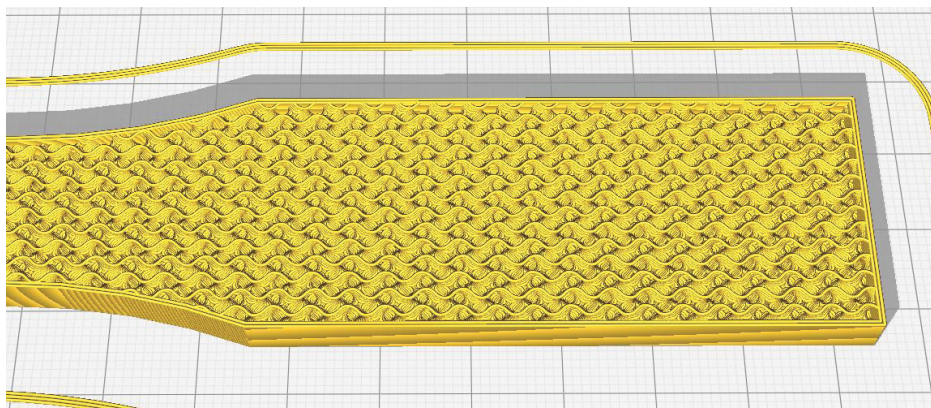


FONTE: O Autor. Utilizando o software CURA (2021).

As pirâmides são combinadas uma de cabeça para cima e as outras imediatamente ao seu redor estão invertidas.

- Giróide: Um preenchimento 3D especial que se assemelha a ondas nos eixos X e Y. A FIGURA 68 mostra esse preenchimento cortado em uma secção transversal.

FIGURA 68 - PREENCHIMENTO TIPO GIRÓIDE

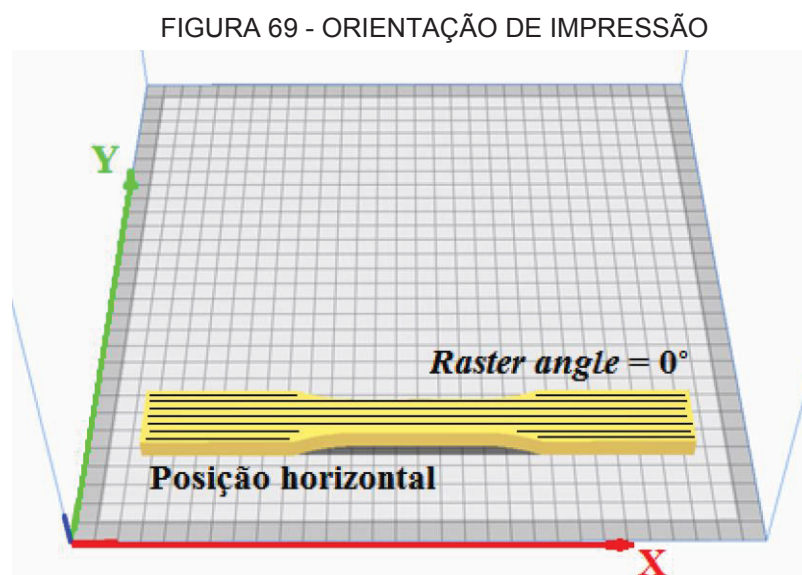


FONTE: O Autor. Utilizando o software CURA (2021).

É um preenchimento que apresenta boa resistência para peças que serão esforçadas em múltiplas direções, porém requer bastante tempo para ser impresso devido a elevada quantidade de mudanças de direção que o cabeçote executa.

As peças impressas com esses três tipos de preenchimento foram fabricadas em três densidades de preenchimento: 25%, 50% e 75%. Foram escolhidos esses valores, pois compreendem três quartis do intervalo de preenchimento total, e foram considerados os melhores para avaliar os tipos de preenchimento. Adicionalmente a utilização de 3 densidades permite se criar linhas de tendência e são preenchimentos representativos dentro do *range* de 0% a 100%.

Todas as amostras dos corpos de prova foram impressas na horizontal em relação à mesa de impressão, e o *raster angle* foi de 0° no sentido de maior comprimento. Essa configuração é apresentada na FIGURA 69.



FONTE: O Autor, (2021).

Foram fabricados 3 corpos de prova para cada tipo diferente de preenchimento totalizando 27 amostras. A norma ASTM D638 – 14 no item 7 recomenda que sejam utilizadas 5 amostras de cada tipo. Porém devido a restrições financeiras relativas à contratação do laboratório para fazer os ensaios foram feitos apenas 3 de cada. Apesar de ter se uma menor confiabilidade em um ensaio com menos amostras, acredita-se que devido aos cuidados tomados e ensaios profissionais, essa diminuição no número de amostras ainda trará um resultado confiável.

A seguir listamos a relação final de corpos de prova impressos em suas respectivas densidades e preenchimentos.

- Cúbico 3 unidades com densidade de 25%, 3 com 50% e 3 com 75%.
- Octeto 3 unidades com densidade de 25%, 3 com 50% e 3 com 75%.
- Giróide 3 unidades com densidade de 25%, 3 com 50% e 3 com 75%.

Com o padrão de preenchimento e densidade de preenchimento dos corpos de prova já determinados, foi feita a escolha dos demais parâmetros necessários para a impressão da peça. Baseado nos trabalhos correlatos e dados encontrados na literatura, foi determinada a temperatura de extrusão, diâmetro do bico de extrusão, altura da camada, temperatura da plataforma e velocidade de impressão. Esses valores foram escolhidos de maneira a obter as melhores propriedades mecânicas dos corpos de prova (CHACÓN et al., 2017). Esses e outros parâmetros de impressão que foram escolhidos são mostrados na TABELA 7. Esses valores foram idênticos para a impressão de todas as amostras.

TABELA 7 - PARÂMETROS PARA IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA

PARÂMETROS DE IMPRESSÃO.	
VELOCIDADE DE IMPRESSÃO	50mm/s
ESPESSURA DA CAMADA	0,1 mm
TEMPERATURA DE IMPRESSÃO	225°C
TEMPERATURA DA PLATAFORMA	50°C
<i>RASTER ANGLE</i>	0°
ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO	HORIZONTAL (X)
QUANTIDADE DE PERÍMETROS	3
DIÂMETRO DO BICO	0,4mm
DENSIDADE DE PREENCHIMENTO	25%, 50%, 75%

FONTE: O Autor, (2021).

Em seguida foi feita a montagem e calibração da impressora 3D CREALITY e iniciou-se a fabricação dos corpos de prova. A FIGURA 70 mostra a impressora durante a impressão de uma das amostras.

FIGURA 70 - IMPRESSORA 3D CREALITY EM FUNCIONAMENTO



FONTE: O Autor, (2021).

Os corpos de prova foram impressos um de cada vez na impressora. Apesar de ser possível imprimir mais de um por vez, isso poderia afetar a variabilidade da resistência das peças. Visto que enquanto a impressora estivesse imprimindo a camada do segundo corpo de prova, o primeiro estaria esfriando. E como visto anteriormente isso pode afetar negativamente a fusão e aderência entre as camadas.

Todos os 27 corpos de prova foram impressos ao longo de uma semana. Podemos ver na FIGURA 71, uma imagem de todos eles finalizados e devidamente identificados.

FIGURA 71 - CORPOS FINALIZADOS NA IMPRESSORA 3D



FONTE: O Autor, (2021).

Após todos os corpos serem fabricados eles foram medidos com o paquímetro e pesados, para confirmar que não haviam defeitos ou anomalias, esses valores serão expostos mais à frente neste trabalho. Não foi observado visualmente nenhum defeito externo como trincas, delaminações, empenamentos ou porosidades.

Em seguida todos os corpos de prova foram embalados hermeticamente preparados para envio.

3.3 ENSAIOS DE TRAÇÃO

A seguir é detalhado um pouco mais a etapa de ensaios de tração, assim como quais parâmetros foram coletados e com que finalidade. Assim como o formato dos corpos de prova, os parâmetros do ensaio de tração também são determinados pela ATM D638.

O processo se inicia com a certificação de que as amostras estejam firmemente fixadas nas garras da máquina, e os parâmetros carregados, então se dá início ao

teste. Conforme a norma, os testes são realizados a uma velocidade de 5 mm / min até a quebra.

A repetitividade e confiabilidade dos ensaios de tração são de suma importância para aquisição de valores confiáveis para análise. Devido às grandes possibilidades de variações em peças impressas por FDM em plataforma aberta, tanto o controle rígido durante a impressão como o controle durante o ensaio devem ser priorizados.

De modo a garantir os melhores ensaios possíveis, foi contratada uma empresa especialista em ensaios de tração em materiais poliméricos. A empresa denominada Tork Controle Tecnológico de Materiais, está localizada na cidade Barra Funda no estado de São Paulo.

Todas as amostras foram ensaiadas com sucesso e com resultados convergentes. Conclui-se que o investimento de fazer os ensaios em um laboratório especializado tenha valido a pena, pois apesar de ter um custo mais elevado, entregou resultados confiáveis. Com os resultados foi possível elaborar uma análise detalhada das características mecânicas dos tipos e densidades de preenchimento, assim como propor um Modelo de Rompimento para os corpos de prova (item 4.6).

De modo a calcular com a capacidade do processo de impressão relativo à seção transversal da parte estreita dos corpos de prova, foram utilizadas as seguintes equações de CP e CPK, equações 10 e 11 (KOTZ et al., 2007):

$$CP = \frac{LSE - LIE}{6 * \sigma} \quad (10)$$

$$CPK = \frac{Xmd - LIE}{3 * \sigma} \quad (11)$$

Onde:

CP = Capabilidade do processo

LSE = Limite superior especificado

LIE = Limite inferior especificado

σ = Desvio padrão das amostras

CPK = Capabilidade do processo K

Xmd = Mediana das amostras

E de maneira a estabelecer uma tolerância da seção transversal da peça baseada na capacidade do processo e da impressora foram criadas as seguintes equações.

As equações 7, 8 e 9 explicitam o cálculo utilizado para determinar o intervalo aceitável da seção transversal do corpo de prova

$$A_{teórica} = 19mm * 10mm = 190mm^2 \quad (7)$$

$$A_{máxima} = (19 + 2 * 0,1)mm * (10 + 1 * 0,1)mm = 193,92mm^2 \quad (8)$$

$$A_{mínima} = (19 - 2 * 0,1)mm * (10 - 1 * 0,1)mm = 186,12mm^2 \quad (9)$$

Onde:

$A_{teórica}$ = Área teórica nominal da seção transversal

$A_{máxima}$ = Área máxima permissível da seção transversal

$A_{mínima}$ = Área mínima permissível da seção transversal

3.4 COMPOSIÇÃO DA CURVA MÉDIA TENSÃO X DEFORMAÇÃO

As curvas do comportamento mecânico apresentadas na seção 4 são compostas pela média entre os 3 corpos de prova que representam cada densidade de preenchimento para cada preenchimento. Para cada valor de deformação, variando em intervalos de 0,01%, foi feito a média dos valores de tensão correspondentes (os preenchimentos de Octeto de 25% e 50% tiveram uma amostra desconsiderada devido a uma anormalidade nos valores, advinda de algum defeito de qualidade interno não perceptível na inspeção visual após impressão).

Esses valores resultaram em cada uma das curvas apresentadas. A TABELA 8, mostra como exemplo as primeiras 18 linhas da compilação dos dados dos ensaios do Octeto com 50% de densidade utilizados nesse cálculo (as leituras completas possuem em torno de 350 linhas).

TABELA 8 – MÉTODO DE ASSOCIAÇÃO DAS CURVAS DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Deformação [%] - Gráfico 1	Tensão [MPa] - Gráfico 1	Deformação [%] - Gráfico 2	Tensão [MPa] - Gráfico 2	Deformação [%] - Gráfico 3	Tensão [MPa] - Gráfico 3	DEFORMAÇÃO	Tensão Amostra 1	Tensão Amostra 2	Tensão Amostra 3	Tensão média
1											
2	0,01	0,414308	0,01	0,305127	0,008	0,2577	0,01	0,414308	0,305127	0,2577	0,325711667
3	0,014	0,451489	0,014	0,336692	0,012	0,299773	0,02	0,499294	0,39456	0,415475	0,436443
4	0,018	0,499294	0,016	0,362996	0,016	0,357624	0,03	0,605526	0,552385	0,557473	0,571794667
5	0,022	0,547098	0,02	0,39456	0,02	0,415475	0,04	0,754252	0,683905	0,63636	0,691505667
6	0,028	0,605526	0,024	0,436647	0,026	0,483844	0,05	0,929536	0,899598	0,809913	0,879682333
7	0,032	0,674578	0,028	0,489255	0,03	0,557473	0,06	1,11544	1,05216	0,988725	1,052108333
8	0,036	0,754252	0,03	0,552385	0,036	0,63636	0,07	1,30666	1,21525	1,16754	1,229816667
9	0,042	0,839238	0,034	0,615514	0,042	0,720507	0,08	1,49788	1,37833	1,34635	1,40752
10	0,046	0,929536	0,038	0,683905	0,046	0,809913	0,09	1,69441	1,55194	1,44101	1,562453333
11	0,052	1,02515	0,042	0,752295	0,052	0,899319	0,1	1,79533	1,72554	1,61983	1,713566667
12	0,058	1,11544	0,046	0,825947	0,058	0,988725	0,11	1,98655	1,81498	1,8039	1,868476667
13	0,062	1,21105	0,05	0,899598	0,064	1,07813	0,12	2,18308	1,99385	1,98271	2,053213333
14	0,068	1,30666	0,054	0,973249	0,07	1,16754	0,13	2,27869	2,16745	2,07212	2,172753333
15	0,074	1,40227	0,058	1,05216	0,074	1,25694	0,14	2,46991	2,25689	2,25619	2,327663333
16	0,08	1,49788	0,064	1,13633	0,08	1,34635	0,15	2,66113	2,44101	2,44026	2,514133333
17	0,086	1,5988	0,068	1,21525	0,086	1,44101	0,16	2,85766	2,53045	2,61907	2,66906
18	0,09	1,69441	0,074	1,29416	0,092	1,53042	0,17	2,95327	2,70932	2,71373	2,792106667

FONTE: O Autor, (2021).

Os cálculos utilizados para plotar as curvas médias no programa Microsoft Excel foram:

- Amostra 1: H=VLOOKUP(G2;A:B;2;1)

- Onde:
- G2 = Coluna com os valores a serem procurados relativos à deformação. Esse valor começa em 0,01 e vai até o valor máximo de deformação observado na amostra. Esse valor será buscado na coluna A e retornará o valor correspondente da coluna B.
- A = Coluna com os valores da deformação do corpo de prova coletados durante o ensaio.
- B = Coluna com os valores de tensão aplicados no corpo de prova durante o ensaio.
- O número '2' na penúltima posição da fórmula significa que deve ser retornado o valor correspondente na coluna 'B', que é a segunda coluna do *array* (A=1, B=2). E o último número da fórmula, '1' significa que pode ser procurado um valor aproximado.

- Amostra 2: I=VLOOKUP(G2;C:D;2;1)

- Funcionamento semelhante a explicação anterior, porém agora utilizando as colunas C e D pertencentes aos valores da amostra 2, e alimentando a coluna I.
- Amostra 3: $J=VLOOKUP(G2;E:F;2;1)$
 - Funcionamento semelhante a explicação anterior, porém agora utilizando as colunas E e F pertencentes aos valores da amostra 3, e alimentando a coluna J.
- A coluna final com os valores médios das tensões para cada valor de deformação é calculada da seguinte forma:
 - $K = AVERAGE(H:I:J)$
- Por fim a curva é plotada utilizando os valores da coluna G (valores de deformação em intervalo de 0,01%), e os valores da coluna K (valores médios de todas as tensões em cada ponto).

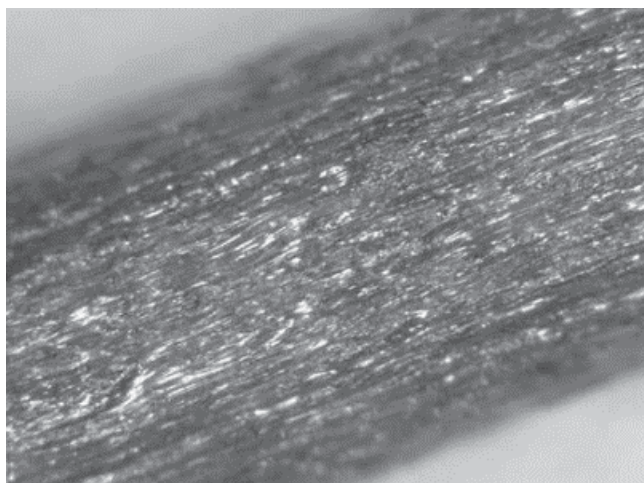
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é apresentado os resultados obtidos durante a fabricação e ensaio das amostras. Assim como será analisado os valores e comportamento do material, de modo a caracterizá-los.

4.1 ANÁLISE DO FILAMENTO

A inspeção microscópica externa do filamento mostrou que o mesmo tem um formato externo rugoso, FIGURA 72, que pode estar associado a concentração de fibras de carbono na matriz de PLA.

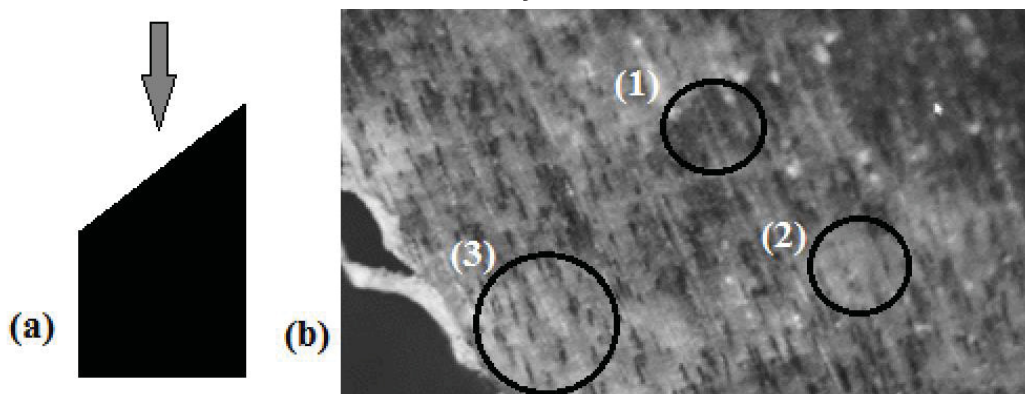
FIGURA 72 – MICROSCOPIA EXTERNA DO FILAMENTO



FONTE: O Autor, (2021).

De modo a verificar a disposição das fibras do carbono, fez-se uma análise microscópica da seção transversal em ângulo do filamento. Para isto, uma amostra foi seccionada e embutida em baquelite para análise microscópica. Foi analisado a disposição e concentração das fibras de carbono dentro do filamento. O resultado é apresentado na FIGURA 73.

FIGURA 73 – MICROSCOPIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO FILAMENTO



FONTE: O Autor, (2021).

A parte (a) da FIGURA 73 mostra o ângulo, de aproximadamente 45%, em que o filamento foi seccionado e observado. Na parte (b), observa-se regiões mais escuras (1) e mais claras (2 e 3) essa diferença se deve a concentração das fibras de carbono neste local. As regiões mais escuras mostram uma concentração maior da fibra em relação às mais claras onde predomina o PLA puro. As fibras observadas parecem estar orientadas em relação ao comprimento do filamento, que é a disposição ideal para o aumento da resistência.

4.2 DADOS DA IMPRESSÃO

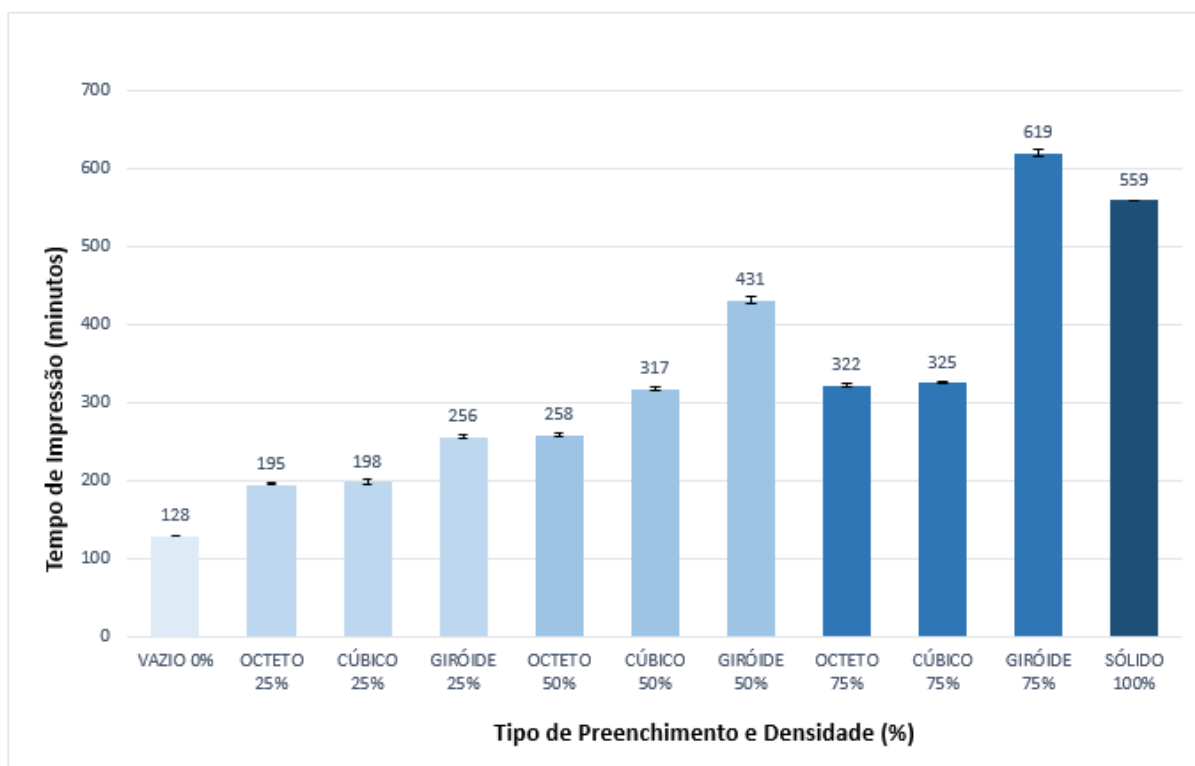
Nesta etapa será mostrado dados coletados durante a fabricação dos corpos de prova.

4.2.1 Tempos de impressão

O tempo necessário para imprimir cada corpo de prova varia de acordo com o tipo de preenchimento e densidade. Isso se deve não só a quantidade de material depositada (densidade de preenchimento), mas também com as movimentações demandadas do cabeçote devido ao tipo (geometria) do preenchimento. O tempo total para imprimir as amostras (27 unidades) foi de 160,92 horas. No GRÁFICO 5 é

apresentada a média de tempo de impressão e a variação, para cada grupo de corpos de prova.

GRÁFICO 5 – VARIAÇÃO E TEMPO MÉDIO DE IMPRESSÃO



FONTE: O Autor, (2021).

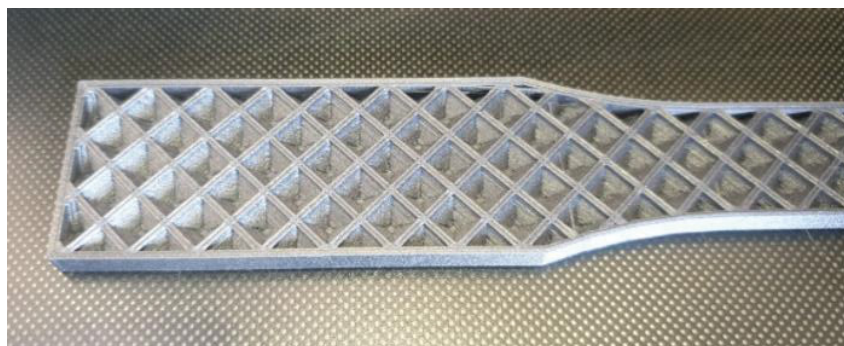
Observa-se que o preenchimento que utiliza linhas retas na sua construção como o Octeto tem o tempo de impressão menor que preenchimentos ondulados como o Giróide. Isso ocorre porque cada mudança de direção do cabeçote necessita de uma desaceleração e nova aceleração. Devido ao seu formato ondulado, o preenchimento tipo Giróide é o que leva mais tempo para ser impresso. Os preenchimentos Octeto e Cúbico tem tempos de preenchimento semelhantes devido as suas geometrias parecidas.

Um fenômeno interessante é que o corpo de prova impresso com 100% de preenchimento, do tipo retilíneo, exige um tempo menor para fabricação do que um impresso com 75% de preenchimento do tipo Giróide, corroborando com a observação feita onde as acelerações e desacelerações do cabeçote afetam o tempo de impressão.

O tempo de fabricação da amostra vazia com 0% de preenchimento é teórica e fornecida pelo *slicer* CURA, pois na prática não seria possível imprimir uma peça com estas condições por não haver apoio para a camada superior. Esta condição foi simulada para saber qual o tempo para imprimir apenas a casca, permitindo na sequência calcular o tempo necessário para imprimir os preenchimentos.

A amostra impressa em menor tempo foi a com preenchimento Octeto e 25% de preenchimento, ela foi completa em 3 horas e 14 minutos. Uma imagem dessa peça pode ser vista na FIGURA 74.

FIGURA 74 – CORPO DE PROVA OCTETO COM 25% DE DENSIDADE DE PREENCHIMENTO



FONTE: O Autor, (2021).

O exemplar com tipo de preenchimento Cúbico com 50% de densidade de preenchimento é mostrado na FIGURA 75.

FIGURA 75 – CORPO DE PROVA CÚBICO COM 50% DE DENSIDADE DE PREENCHIMENTO



FONTE: O Autor, (2021).

O corpo de prova com maior tempo de impressão foi o de preenchimento Giróide com 75% de preenchimento (FIGURA 76). Essa amostra levou 10 horas e 25 minutos para ficar pronta.

FIGURA 76 – CORPO DE PROVA GIRÓIDE COM 75% DE DENSIDADE DE PREENCHIMENTO



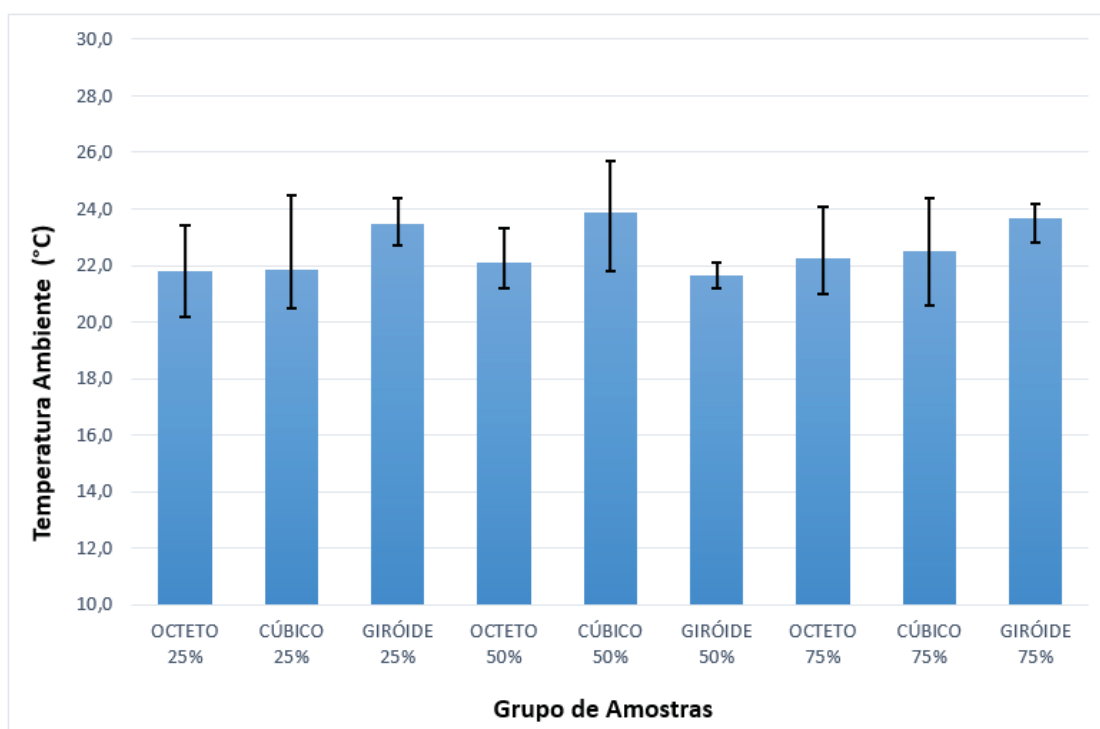
FONTE: O Autor, (2021).

Peças com tempo alto de fabricação estão mais suscetíveis a erros de impressão por interrupções de energia elétrica, superaquecimento da plataforma, entupimento de bico de extrusão. Portanto requerem mais atenção durante sua impressão.

4.2.2 Temperatura ambiente de impressão

Em fabricações 3D utilizando impressoras FDM de plataforma aberta, a temperatura ambiente tem um impacto significativo na impressão das peças. Neste trabalho apesar da temperatura ambiente não ter sido controlada, ela foi monitorada com um termômetro de modo a permitir uma replicação dos resultados. O GRÁFICO 6 mostra a média da temperatura ambiente e as variações para cada grupo de amostras.

GRÁFICO 6 – TEMPERATURA MÉDIA AMBIENTE DURANTE A FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA



FONTE: O Autor, (2021).

Visto que a temperatura ambiente mais baixa durante a impressão foi de 21,6 °C, e a mais alta 25,7°C, tivemos uma amplitude de 4,1°C. Essa variação não foi considerada relevante para as análises visto que foi utilizado uma plataforma aquecida a 50°C, a altura de peça de 10mm (permitindo uma boa condução térmica) e uma temperatura de impressão de 225°C.

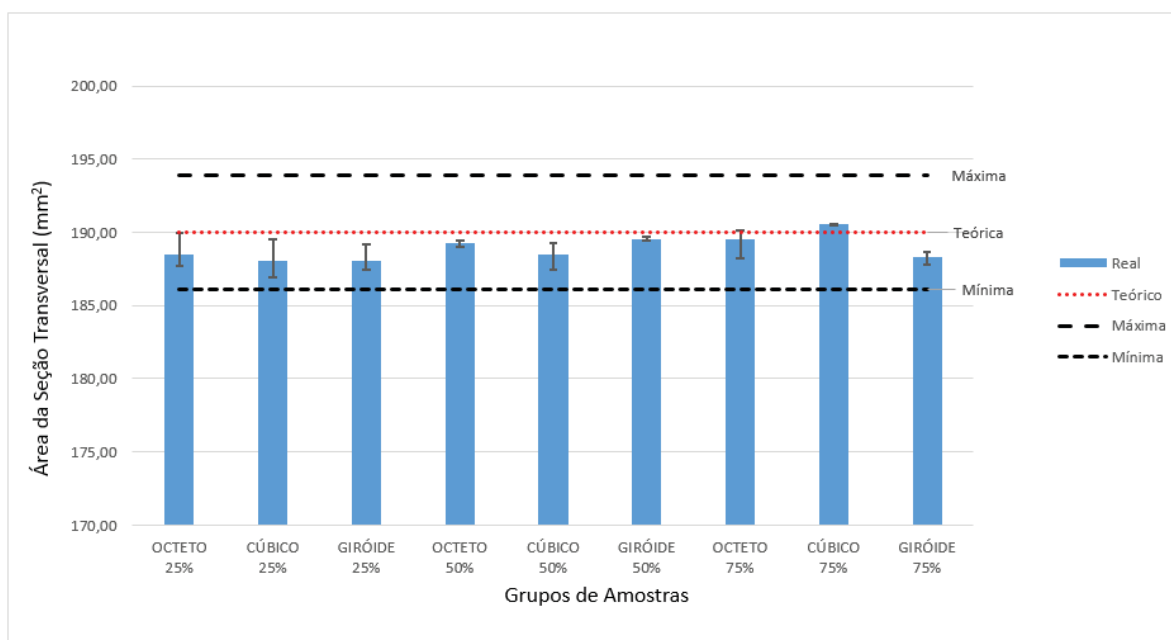
4.3 ANÁLISE FÍSICA DOS CORPOS DE PROVA

Uma inspeção visual e de medição dos corpos de prova enviados para ensaio garantiu que todos estivessem sem falhas, buracos ou delaminações aparentes. Nos corpos de prova em que foram identificadas falhas, estes foram descartados, e na sequência reimpressos e submetidos a uma nova inspeção.

4.3.1 Seção transversal e medidas externas

A medida de maior importância em um corpo de prova para um ensaio de tração é a área da seção transversal da parte estreita (base para cálculos), pois é nesse local onde ocorre o rompimento da amostra. O GRÁFICO 7 faz uma comparação entre as áreas das seções transversais reais (medidos) dos corpos de prova com a seção do modelo CAD (teórica) e junto plotado os valores máximo e mínimo considerando o erro do equipamento durante a deposição. Observa-se que todos os valores ficaram próximo ao nominal e dentro do erro da máquina.

GRÁFICO 7 – ÁREA MÉDIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL ESTREITA DOS CORPOS DE PROVA



FONTE: O Autor, (2021)

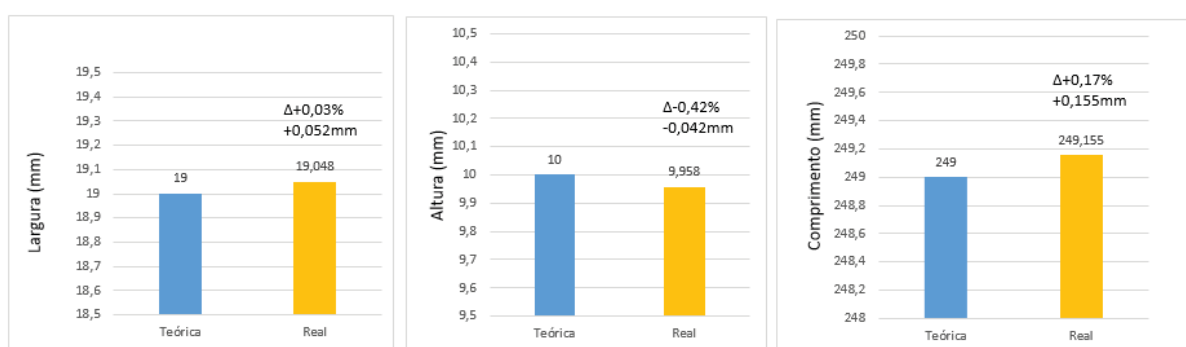
A precisão (erro) da impressora 3D utilizada é de $\pm 0,1\text{mm}$, e essa tolerância incide sobre cada uma das paredes da casca do corpo de prova. Esse valor foi utilizado para calcular o intervalo de seção transversal atingível dada a precisão do equipamento.

Adicionalmente foi feita uma análise da Capacidade do Processo para verificar se o processo é capaz de atender estatisticamente a especificações dimensionais dos corpos de prova, para isto foi utilizada as equações 10 e 11 (KOTZ et al., 2007):

O valor calculado para CP é de 1,19. Como esse valor é maior do que 1, mostra que o processo estudado tem capacidade de produzir 99,7% de peças dentro da faixa de especificação. O valor de CPK foi calculado em 0,919. Isso indica que a capacidade do processo não está estatisticamente controlada sendo capaz de apresentar 1350 PPM fora do limite especificado. O CPK em 0,919 indica que se fossem fabricadas um número grande de amostras algumas teriam uma seção transversal fora das especificações nominais de projeto. De modo a fabricar confiavelmente lotes grandes, onde não fosse possível medir todas as amostras, correções teriam que ser feitas nos parâmetros da máquina para melhorar os valores de CP e CPK.

A média das medidas da largura da seção estreita, altura e comprimento dos corpos de prova são apresentadas no GRÁFICO 8. Os valores comparam as medidas dimensionais nominais (modelo CAD) e as reais médias dos corpos de prova fabricados.

GRÁFICO 8 - MEDIDAS TEÓRICAS E REAIS DAS DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA



FONTE: O Autor, (2021).

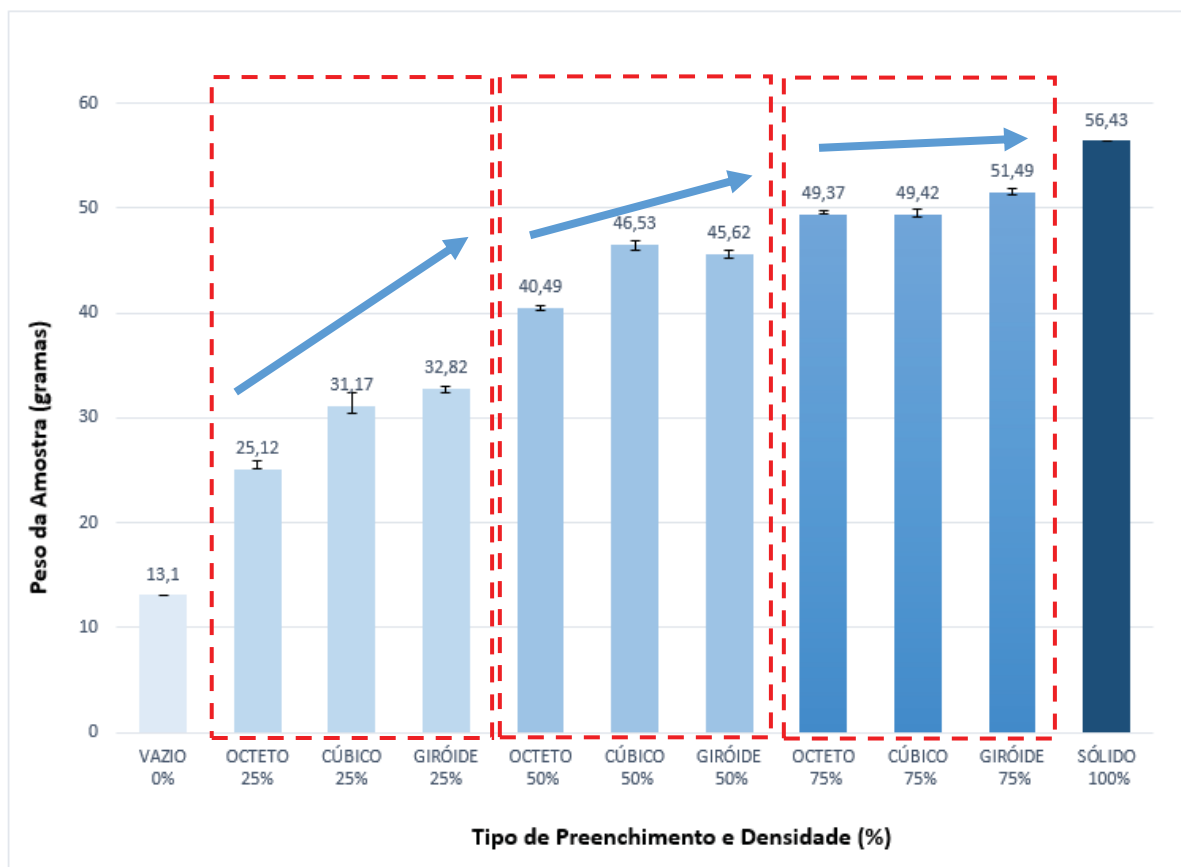
A média das cotas de altura ficou menor do que o valor nominal. Essa cota de altura é um parâmetro que varia com a posição no eixo Z do bico da extrusora durante a impressão de uma nova camada, mas observa-se que o erro está dentro do valor de tolerância da máquina no eixo Z em 0,1mm.

As cotas da largura da seção estreita e comprimento do corpo de prova foram maiores que a nominal, indicando que o sistema automático de compensação para contração térmica padrão para o PLA-puro do *slicer* é adequado e atende as necessidades do PLA-fibra de carbono. O PLA puro tem contração térmica de $4,17 \cdot 10^{-4} [\text{mm/mm}^\circ\text{C}]$ e a fibra de carbono uma contração térmica de $7 \cdot 10^{-6} [\text{mm/mm}^\circ\text{C}]$ (BOTEAN, 2017), sugerindo que o PLA-fibra de carbono tenha uma contração menor que o PLA puro causado pela presença de 15% de fibras de carbono.

4.3.2 Massa dos corpos de prova

As amostras foram pesadas de modo a verificar o efeito da densidade em relação a massa do corpo de prova. A massa da amostra com 0% de preenchimento foi calculada com base no volume da casca dado pelo *SolidWorks* e da densidade do filamento PLA-fibra de Carbono, desta forma tem-se (somente das regiões que compõem a casca da peça) a massa da amostra. Apenas uma peça com 100% de preenchimento foi fabricada, e como inclusive nesse formato é necessário determinar um tipo de preenchimento, foi escolhido o tipo retilíneo pela sua simplicidade e velocidade na impressão. No GRÁFICO 9 é apresentado a média da massa dos grupos de corpos de prova por densidade de preenchimento.

GRÁFICO 9 - VARIAÇÃO E MÉDIA DA MASSA DOS CORPOS DE PROVA



FONTE: O Autor, (2021).

O primeiro fato observado é que para uma mesma densidade de preenchimento, há um aumento significativo de massa entre os preenchimentos (geometrias) que reduz à medida que aumenta a densidade de preenchimento da peça, de 25% até 75%.

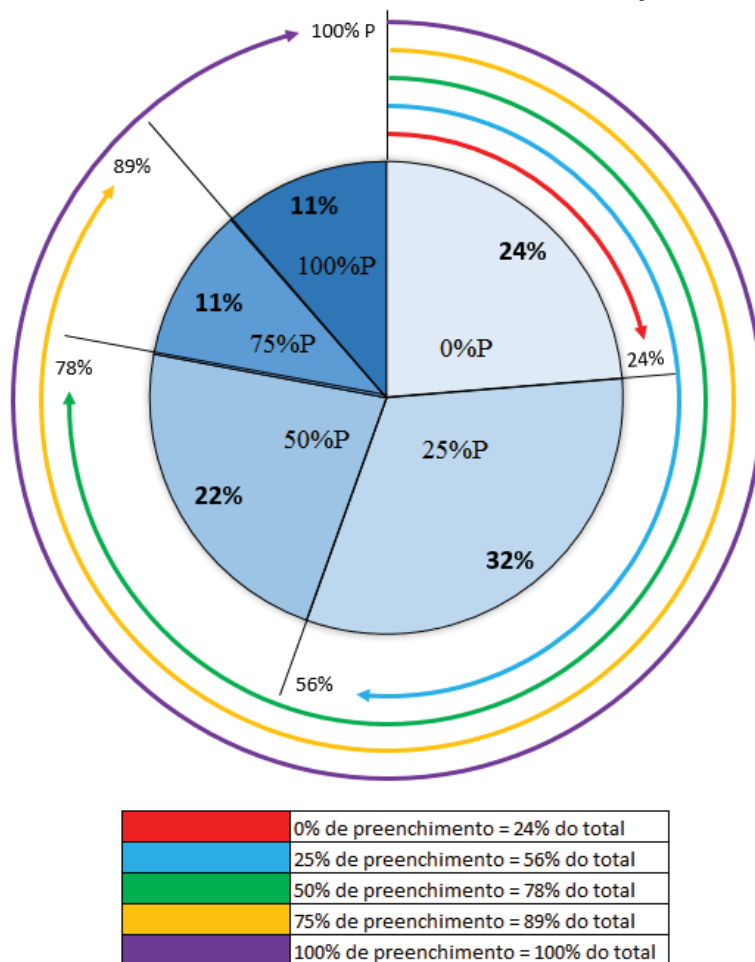
O preenchimento Octeto foi o que apresentou a menor massa em todas as densidades de preenchimento. Para 25%, a geometria Octeto foi mais leve em quase 31% em relação a Giróide, para a densidade de 50% a variação em quase 15% em comparação ao Cúbico (que tem valor próximo a Giróide), e para a densidade de 75% a variação de massa foi de 4,1% para a Giróide.

Essas variações de massa, para peças com a mesma densidade de preenchimento, provavelmente ocorrem devido às aproximações feitas pelo *Slicer* de modo a completar o formato do preenchimento interno escolhido. Visto que, não há

uma interrupção abrupta do preenchimento uma vez a porcentagem de densidade escolhida for alcançada.

Na FIGURA 77 é apresentada uma comparação entre o volume de preenchimento (%) real, calculado com base na massa das amostras, em relação às densidades de preenchimento teóricas (%P) estipuladas no software *Cura*.

FIGURA 77 - DENSIDADES DE PREENCHIMENTO EM RELAÇÃO AO VOLUME TOTAL



FONTE: O Autor, (2021).

Pode-se notar que uma peça impressa com 0% de preenchimento possui 24% do seu volume total com material. E, quando a densidade utilizada foi de 50% este valor foi para 78% do volume total interno preenchido. Para 75% de preenchimento o volume ocupado foi de 89%. Não há um aumento proporcional da massa em relação ao aumento da densidade de preenchimento escolhida. Isso provavelmente ocorre

devido a forma como o *slicer* foi programado para realizar o preenchimento em cada densidade. O *slicer* possui um formato padrão pré-definido para cada tipo de preenchimento em cada densidade (CURA 2021). Quando o usuário escolhe um determinado padrão e densidade, esse perfil é aplicado no volume interno da peça. Não foi observado na literatura estudos que expliquem esse fenômeno, porém acredita-se que ele esteja intrinsecamente ligado à parametrização do *slicer*.

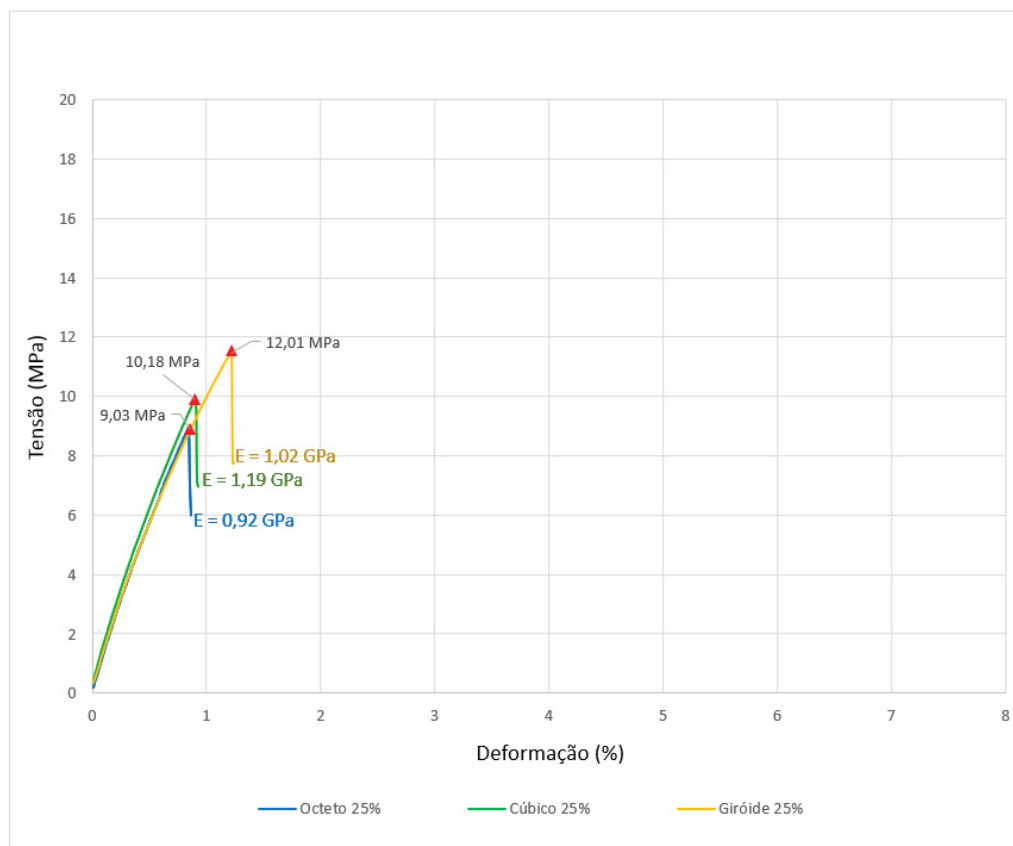
4.4 RESULTADO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os valores coletados durante o ensaio de tração são a carga aplicada e o alongamento resultante. Utilizando as ferramentas gráficas do Excel os gráficos Tensão x Deformação de cada amostra foram plotados. O laboratório onde os ensaios foram feitos não possui controle da temperatura ambiente. Porém, conforme os laudos em anexo, todos os ensaios foram realizados em uma temperatura ambiente de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$.

4.4.2 Comparação entre tipos de preenchimentos com a mesma densidade

O GRÁFICO 10 apresenta o resultado das curvas médias Tensão x Deformação dos ensaios de tração para os corpos de prova com 25% de densidade de preenchimento com os diferentes tipos de preenchimento.

GRÁFICO 10 - COMPARATIVO DOS PREENCHIMENTOS COM 25% DE DENSIDADE



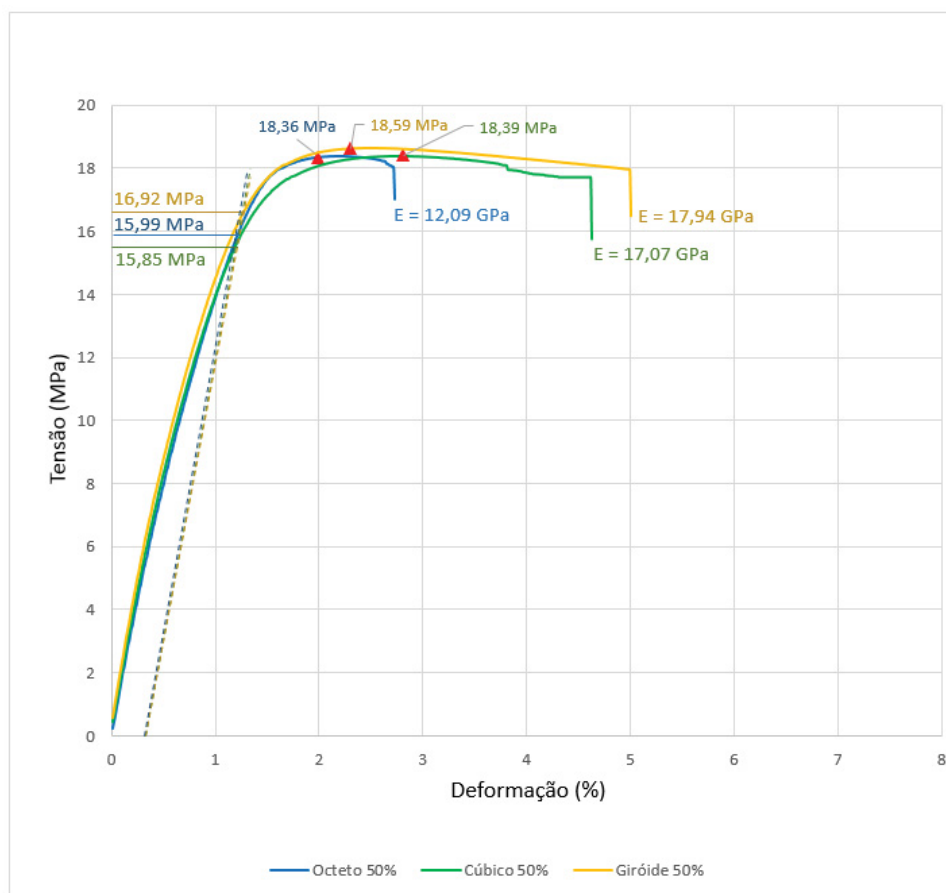
FONTE: O Autor, (2021).

Observa-se que todos os corpos de prova romperam no regime frágil. O preenchimento tipo Giróide foi o que apresentou a maior tensão máxima de 12,01MPa comparado a 10,18 MPa para o Cúbico e 9,03 Mpa para o Octeto. Chama a atenção a baixa deformação dos corpos de prova, com o Giróide obtendo uma deformação máxima até o rompimento de 1,24%.

O módulo de elasticidade calculado foi de 0,92 GPa para Octeto, 1,19 GPa para o Cúbico e 1,02GPa para o Giróide, mostrando valores pouco dispersos para uma mesma densidade de preenchimento e diferentes tipos de preenchimento.

O GRÁFICO 11 apresenta as curvas médias Tensão x Deformação com os resultados para as amostras com 50% de densidade de preenchimento.

GRÁFICO 11 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS PREENCHIMENTOS COM 50% DE DENSIDADE



FONTE: O Autor, (2021).

Observa-se nos gráficos que todos os corpos de prova romperam de forma dúctil, mostrando que, para este grau de preenchimento os corpos de prova já têm uma deformação plástica apreciável.

As tensões de escoamento ficaram de 15,85 MPa para o Cúbico, 15,99 MPa para a Octeto e 16,92 MPa para a Giróide, resultados próximos com menos de 1% de variação.

As tensões máximas ficaram com valores de 18,36 MPa para Octeto, 18,59 MPa para Giróide e 18,39 MPa para o Cúbico, um aumento de aproximadamente 54% comparado com os corpos de prova com 25% de densidade preenchimento.

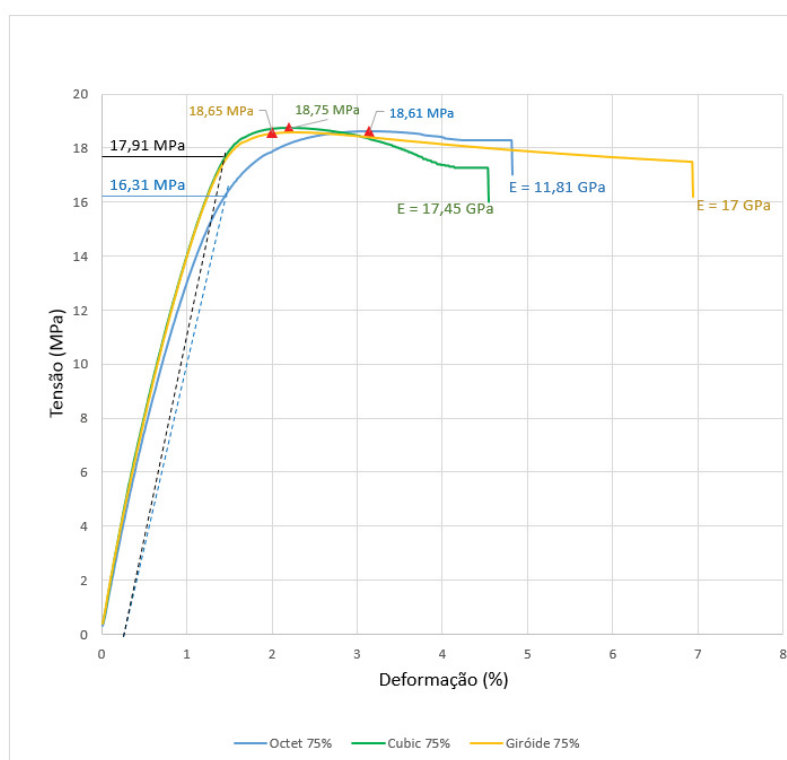
O módulo de elasticidade calculado foi de 12,09 GPa para Octeto, 17,07 GPa para o Cúbico e 17,94 GPa para o Giróide, mostrando que a peça com o

preenchimento Octeto obteve um valor em torno de 31% menor que os outros tipos de preenchimento.

A maior deformação máxima nesta condição de 50% de densidade foi para o preenchimento Giróide, alongando 5% antes de ocorrer a fratura. Isso se deve ao formato ondulado do preenchimento que age como uma mola esticando quando tracionado, permitindo um alongamento maior do corpo de prova antes da ruptura. O preenchimento do tipo Cúbico ficou próximo a 4,7% e o Octeto foi o que apresentou menor valor de 2,7%.

No GRÁFICO 12 são apresentados os resultados médios para a curva Tensão x Deformação obtidos para as amostras com 75% de densidade de preenchimento.

GRÁFICO 12 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS PREENCHIMENTOS COM 75% DE DENSIDADE



FONTE: O Autor (2021)

Observa-se nos gráficos que todos os corpos de prova romperam de forma dúctil e apresentaram uma curva Tensão x Deformação com comportamento mecânico semelhante aos corpos de prova com 50% de densidade, porém com maiores valores para Tensão de Escoamento, Tensão Máxima e Deformação Máxima.

As tensões de escoamento calculadas são de 16,11 MPa para a Octeto e 17,91 MPa para a Cúbica e Giróide, valores próximos dos resultados obtidos nas amostras com 50% de preenchimento. Isto pode ser explicado porque até o ponto de escoamento, a elasticidade se dá pela extensão das cadeias da fase amorfa e retirado a tensão as mesmas voltam a posição original, tendo pouca variação para essas densidades e geometrias de preenchimento.

As tensões máximas ficaram com valores próximos de 18,61 MPa para Octeto, 18,65 MPa para Giróide e 18,75 MPa para o Cúbico, ou seja, valores mais altos comparados aos de 25 % e próximos aos de 50% de preenchimento.

O preenchimento Giróide novamente apresenta um valor mais alto para o alongamento antes da ruptura com 6,92% de deformação, o Cúbico com aproximadamente de 4,8% e o Octeto próximo de 4,4%.

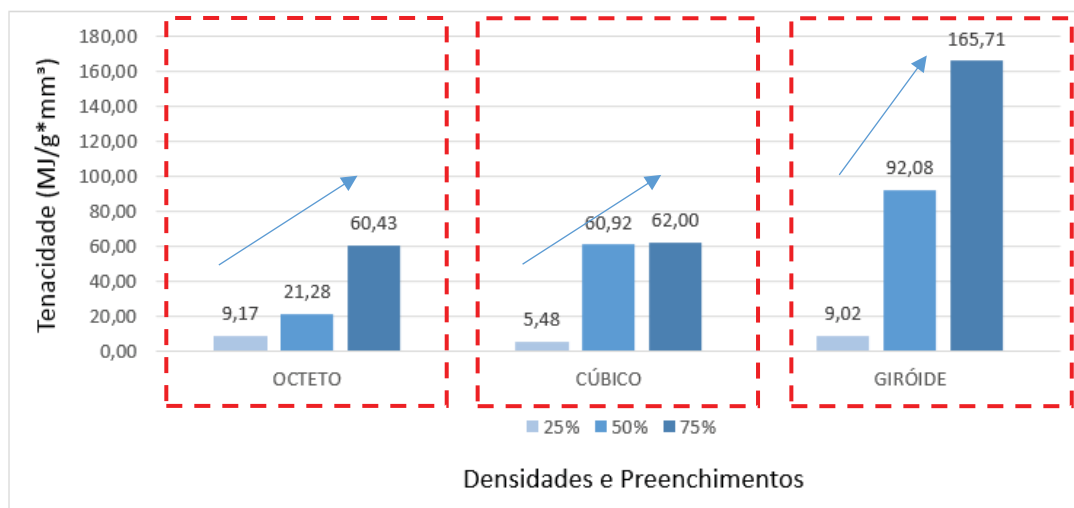
Nos gráficos Tensão x Deformação apresentados nesta seção, foi observado um aumento significativo nos valores da Tensão Máxima, Tensão de Escoamento e Deformação Máxima com o aumento da densidade de preenchimento de 25% para 50%. Para o aumento de 50% para 75% houve uma mudança significativa no alongamento máximo da peça até a ruptura. De maneira análoga, foi observado um aumento significativo de 22% de massa da densidade de preenchimento de 25% para a de 50%. O aumento da densidade de preenchimento de 50% para 75% resultou em um aumento de massa de 11%. Sugerindo que não há uma relação proporcional entre aumento de massa, representado pela densidade de preenchimento, e o aumento da resistência mecânica e deformação máxima da peça.

Os dados sugerem que a rigidez da peça, representado pelo módulo de elasticidade, sofre maior influência da densidade do que do tipo de preenchimento para valores de 25% e 50%.

4.4.3 Tenacidade

O módulo de tenacidade (valor numérico da energia absorvida pela peça até o rompimento) foi calculado para comparar as amostras com 25%, 50% e 75% de preenchimento. Os resultados são apresentados no GRÁFICO 13.

GRÁFICO 13 - RESULTADOS NUMÉRICOS DA COMPARAÇÃO DA TENACIDADE ENTRE AS AMOSTRAS DE 25%, 50% E 75% DE PREENCHIMENTO



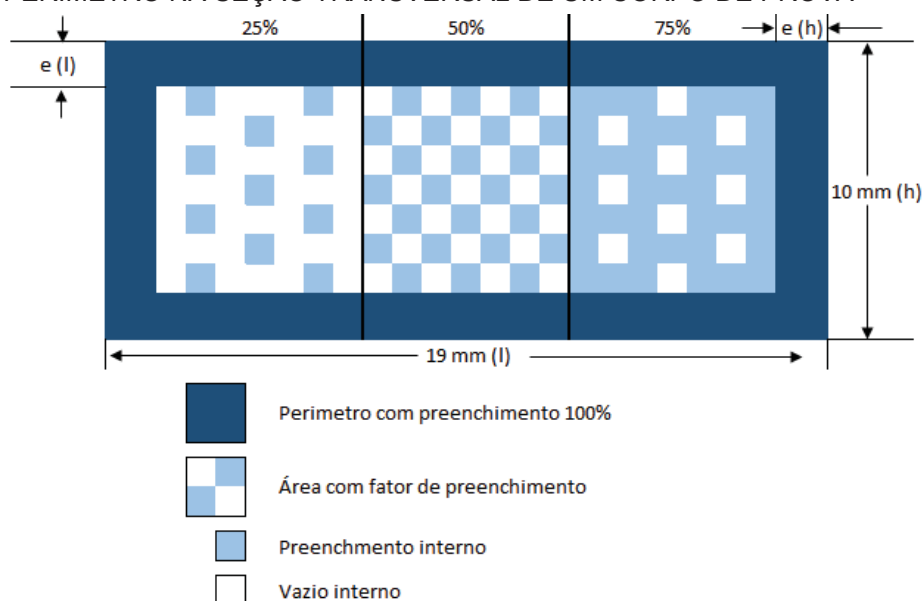
FONTE: O Autor, (2021).

Os dados mostram que a Tenacidade dos corpos de prova aumentou com a densidade de preenchimento. As amostras com 25% mostram baixos valores de Tenacidade mesmo com as diferentes geometrias de preenchimento. Para as amostras com 75% em relação a 25%, a Tenacidade aumentou aproximadamente em 7x para o Octeto, 11x para a Cúbica e 18x para a Giróide. A elevada Tenacidade do corpo de prova Giróide com 75% está associada ao alto valor de alongamento que a amostra sofreu até a ruptura em torno de 7%.

4.4.4 Influência da casca na seção transversal

A FIGURA 78 mostra de modo ilustrativo, uma representação esquemática da seção transversal do corpo de prova com o crescente aumento do preenchimento interno. Onde: $e(l)$ = espessura das cascas de cima e de baixo, $e(h)$ espessura dos perímetros laterais.

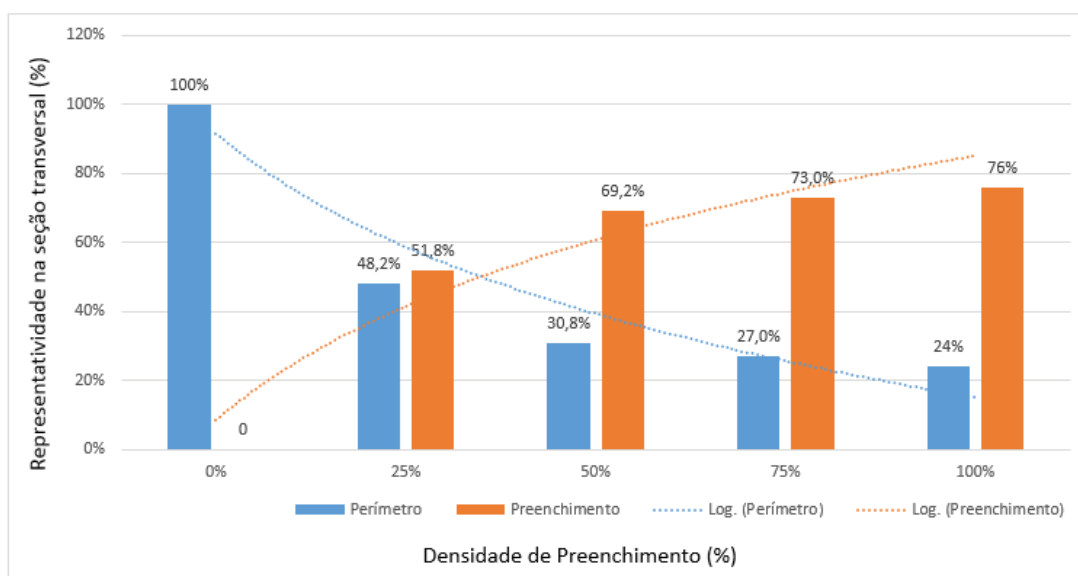
FIGURA 78 – ILUSTRAÇÃO DA PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO INTERNO E PERÍMETRO NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM CORPO DE PROVA



FONTE: O Autor, (2021).

Com base na massa dos corpos de prova e na sua densidade de preenchimento, foram compilados dados para criação de um gráfico comparativo entre a densidade de preenchimento e correspondente representatividade na seção transversal. O GRÁFICO 14 mostra a contribuição da casca e do preenchimento interno na seção transversal total.

GRÁFICO 14 – COMPARAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DA CASCA E DO PREENCHIMENTO PARA A SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA



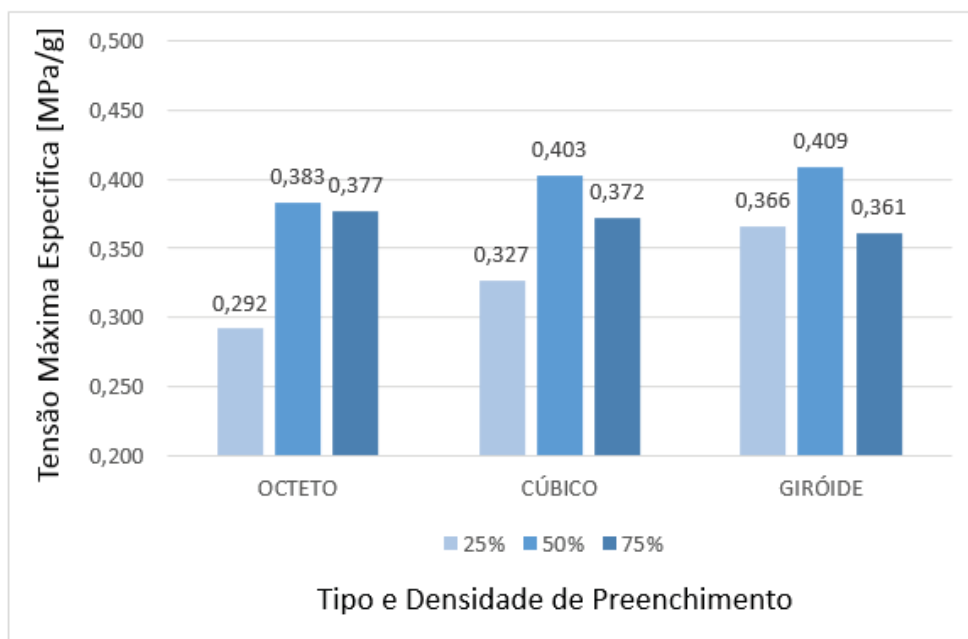
FONTE: O Autor, (2021).

Pelas curvas de tendência, observa-se que ao aumentar a densidade de preenchimento do corpo de prova há uma redução na contribuição da casca na seção transversal da peça. E, até 25%, esta diferença é muito significativa. A partir de 50%, o preenchimento interno tem maior influência na seção transversal. Por exemplo, para as amostras com 25% densidade 48,2% da massa total está localizada na casca e 51,8% no preenchimento da peça. Para 75% de densidade de preenchimento, 27% da massa total está na casca da peça enquanto 73% está localizado no preenchimento da peça.

4.4.5 Tensão e Tenacidade específica

Em seguida foi feita uma comparação entre a Tensão Máxima específica (Tensão Máxima / massa amostra) de cada densidade e preenchimento. O GRÁFICO 15 mostra a comparação.

GRÁFICO 15 - TENSÃO MÁXIMA ESPECÍFICA DOS CORPOS DE PROVA

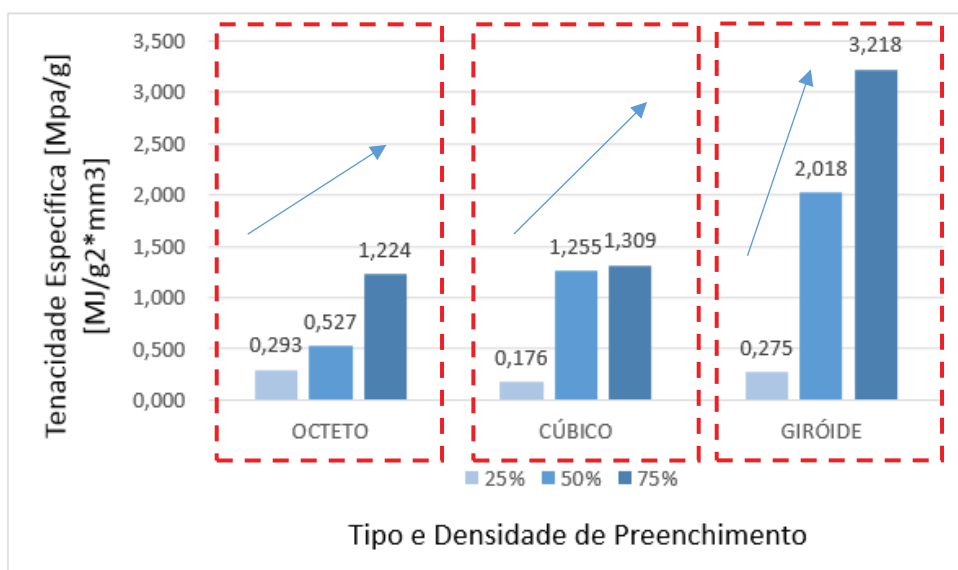


FONTE: O Autor, (2021).

Dentre todas as amostras a que se mostrou com a maior Tensão Máxima Específica foram as com 50% de densidade. O aumento de massa na região do preenchimento, representada pelo aumento de densidade de preenchimento de 50% para 75%, não representou um aumento da Tensão Máxima, ou seja, há uma redução na resistência proporcional entre essas peças. Observa-se que para a condição de 25% e 50% o tipo de preenchimento com maior Tensão específica foi o Giróide. Para 50% o Octeto obteve a maior Tensão Específica.

Da mesma forma, foi feita uma comparação entre Tenacidade Específica dos corpos de prova (Tenacidade máxima/massa da amostra). O GRÁFICO 16 mostra essa comparação, onde fica claro o aumento da tenacidade com o aumento da densidade de preenchimento.

GRÁFICO 16 - TENACIDADE ESPECÍFICA DOS CORPOS DE PROVA



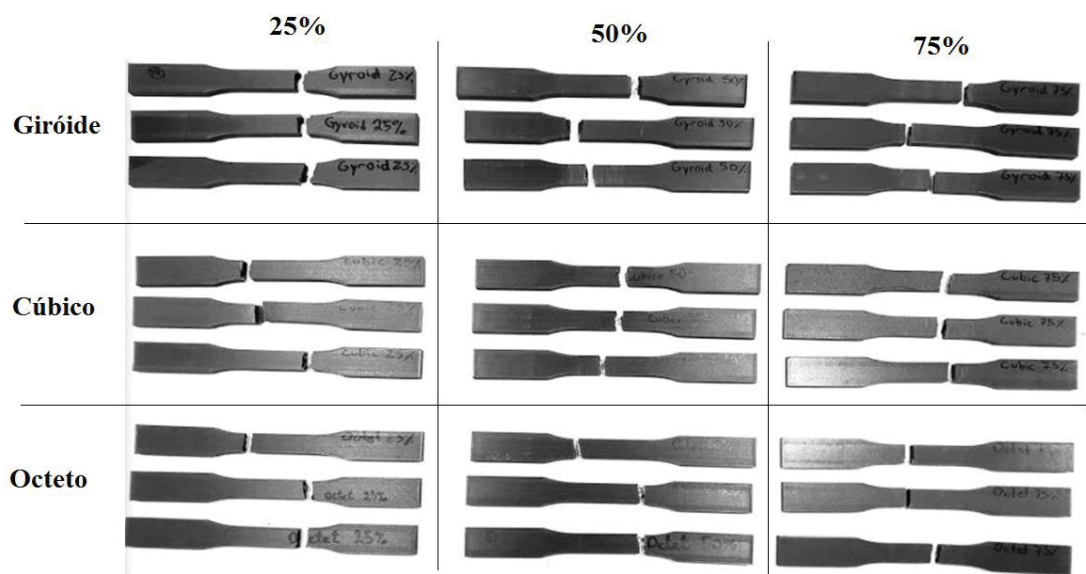
FONTE: O Autor, (2021).

Observa-se que o valor de tenacidade específica é mais alto nas amostras com o preenchimento de Giróide para 50% e 75%. Portanto esse preenchimento se mostrou o mais adequado para aplicações onde a tenacidade for um fator demandado. Isso provavelmente ocorre devido ao formato ondulado, permitindo um alongamento maior antes da ruptura, em relação aos outros preenchimentos compostos por linhas retas.

4.5 MICROGRAFIA DA REGIÃO DE ROMPIMENTO

A FIGURA 79 mostra o aspecto final dos corpos de prova após os ensaios. Eles foram organizados por tipo de preenchimento e densidade.

FIGURA 79 – FOTOGRAFIA DOS 27 CORPOS DE PROVA APÓS RUPTURA

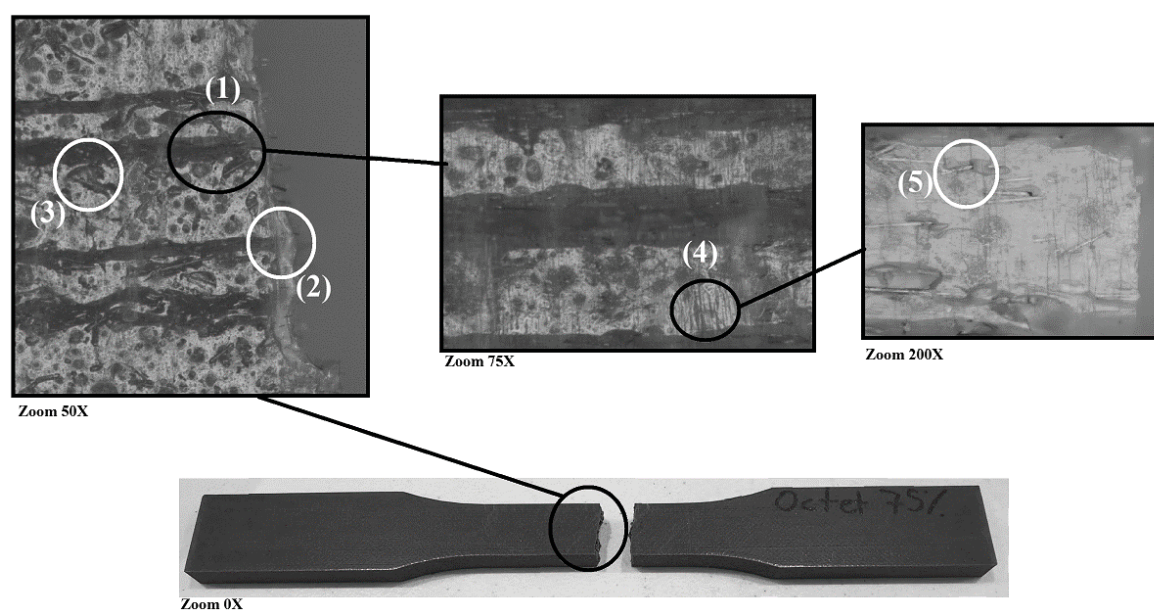


FONTE: O Autor, (2021)

Todos os 27 corpos de prova ensaiados romperam na seção estreita, e não é observada uma estricção nessa região.

A FIGURA 80 mostra uma análise microscópica da casca (superfície) feita na região de rompimento do corpo de prova Octeto com 75% de preenchimento.

FIGURA 80 - MICROGRAFIA DA REGIÃO DE ROMPIMENTO DO CORPO DE PROVA OCTETO 75%

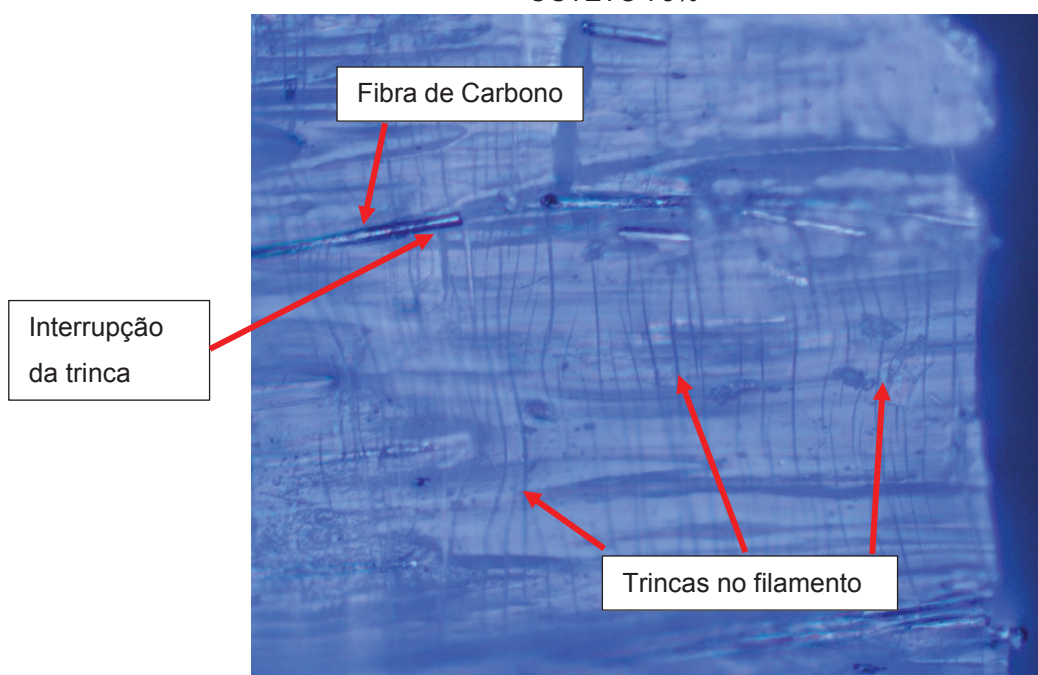


FONTE: O Autor, (2021).

Pode-se observar a região da união lateral dos filamentos (1), assim com o formato de ruptura do filamento (2) que pelo seu característico rompimento em linha reta caracteriza uma fratura frágil do tipo mesa. Em (3) percebe-se uma formação com uma reentrância, esse fenômeno provavelmente foi gerado pela natureza da superfície externa do filamento que é rugosa. Em (4) pode-se notar a aparecimento de várias trincas na superfície externa do filamento da casca. E, em (5) tem-se a exposição de algumas fibras de carbono na superfície externa da peça.

A FIGURA 81 mostra uma imagem ampliada da região de rompimento com ampliação de 200x.

FIGURA 81 - TRINCAS NO FILAMENTO EXTERNO DA CASCA DO CORPO DE PROVA OCTETO 75%

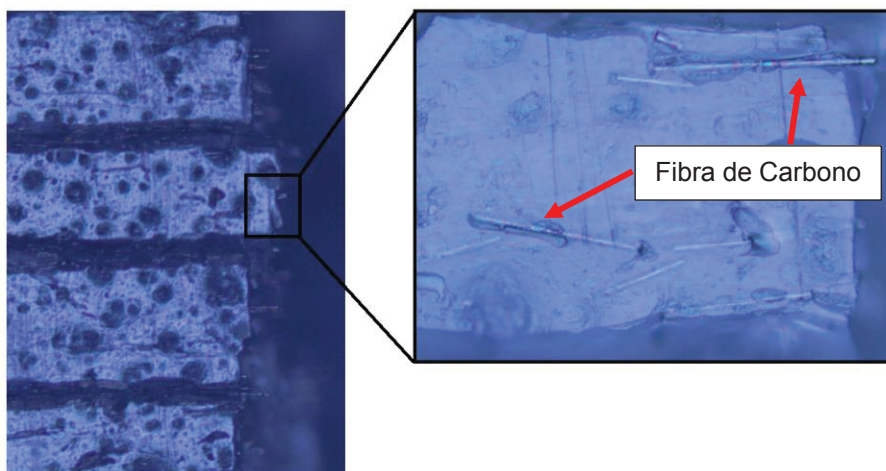


FONTE: O Autor (2021).

É interessante observar como as trincas se propagam através do filamento da matriz de PLA e são bloqueadas, naquele plano, pelas fibras de carbono presentes.

A FIGURA 82 mostra como houve uma exposição das fibras de carbono no local de rompimento do corpo de prova.

FIGURA 82 - FIBRAS DE CARBONO EXPOSTAS NO LOCAL DE ROMPIMENTO

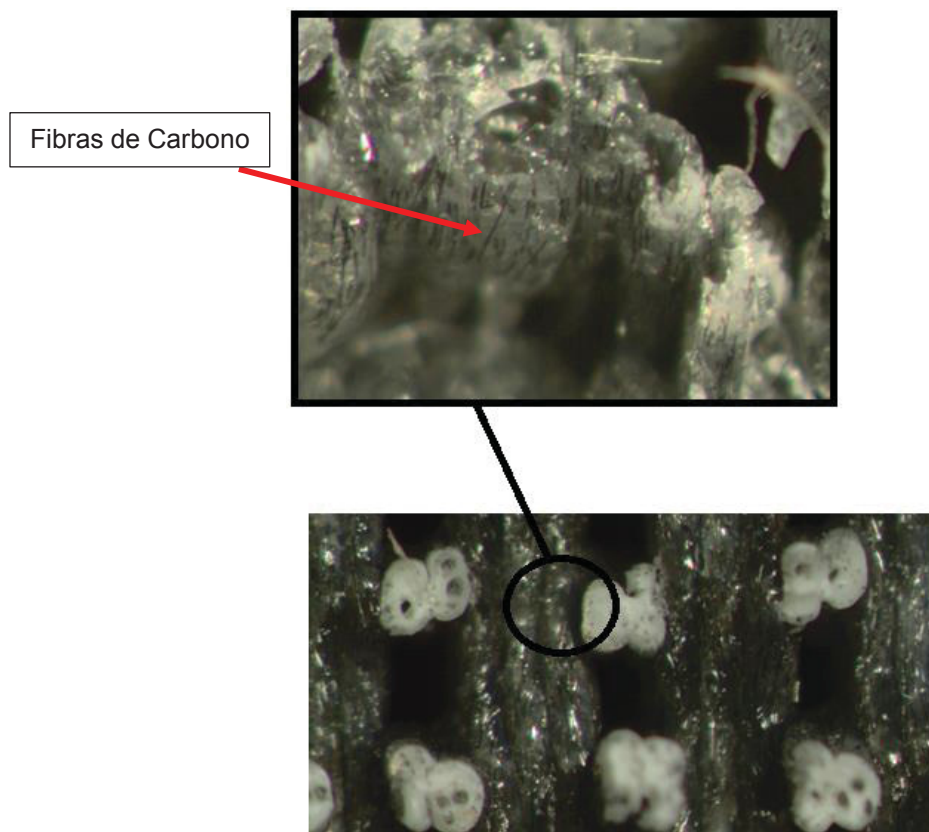


FONTE: O Autor, (2021).

Percebe-se que não houve o rompimento de todas as fibras na ruptura do corpo de prova. Aparentemente várias fibras foram arrancadas da matriz de PLA e se separaram em cada lado do rompimento, resultando na aparência conforme pode ser visto na micrografia.

A FIGURA 83 traz uma imagem da região de rompimento interna do corpo de prova Giróide com 50% de preenchimento.

FIGURA 83 - ROMPIMENTO DÚCTIL DOS FILAMENTOS INTERNOS

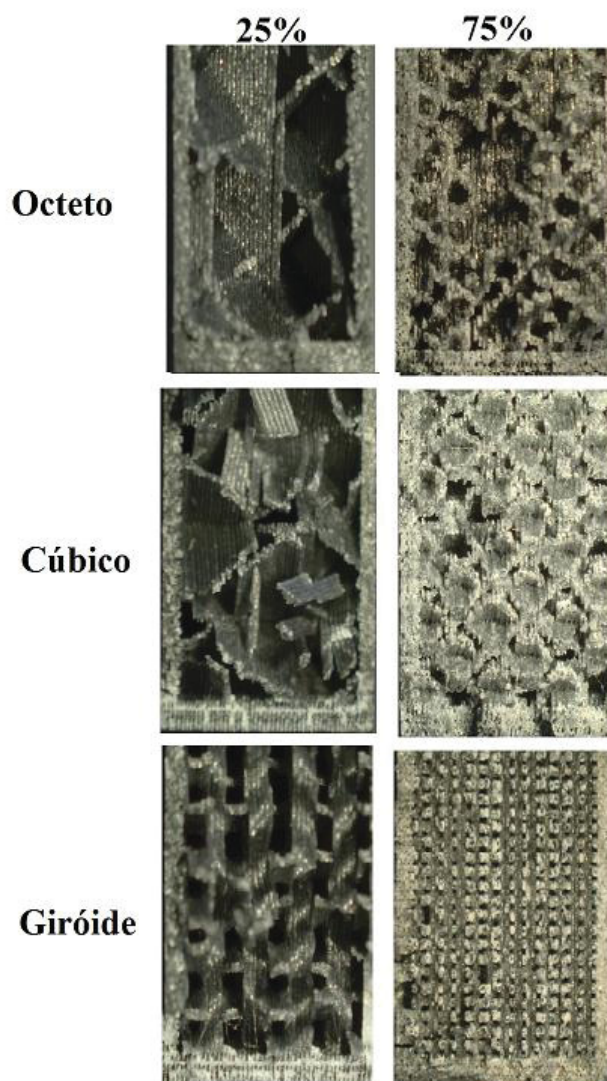


FONTE: O Autor, (2021).

Pode observar uma aparência esbranquiçada dos filamentos que romperam de forma dúctil. Essa aparência se deve ao surgimento de várias micro trincas durante a deformação do material, que afetam a translucidez do material. Também se nota a presença bem visível das fibras de carbono dentro da matéria de PLA.

A FIGURA 84 mostra a aparência das seções transversais dos três tipos de preenchimento nas densidades de 25 e 75%.

FIGURA 84 - MICROGRAFIA DOS TIPOS DE PREPREENCHIMENTO NA SEÇÃO TRANSVERSAL ROMPIDA



FONTE: O Autor, (2021).

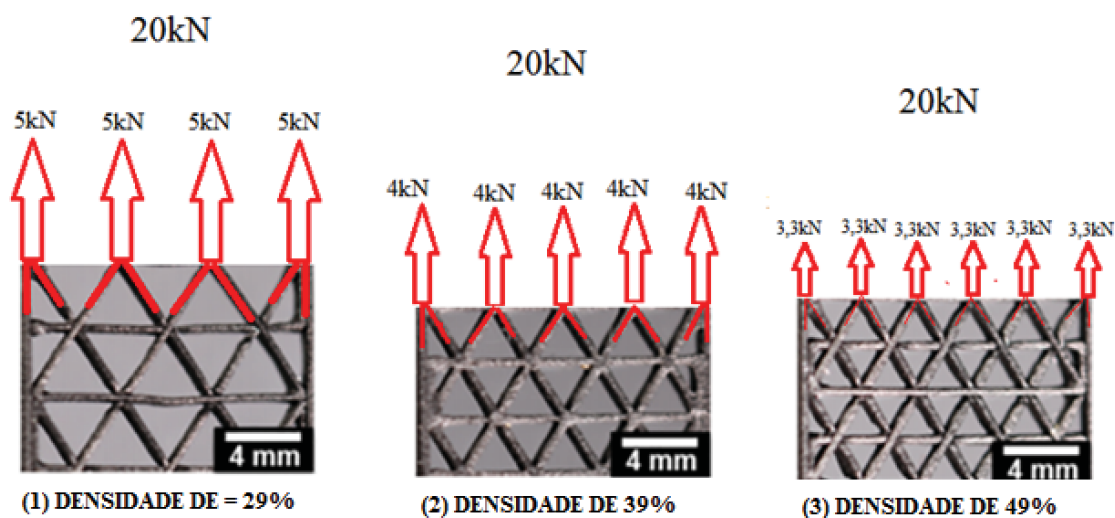
Se percebe a presença da parte da casca e do preenchimento, assim como o aumento de material na região interna, advindo do aumento da densidade de preenchimento.

4.6 PROPOSTA DE MODELO DE ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA

Ao aumentar a densidade de preenchimento de uma peça 3D em FDM, o *slicer* não aumenta a largura das paredes do preenchimento interno, mas sim adiciona paredes diminuindo o espaço vazio entre elas (KUI et al., 2020).

De modo a caracterizar o comportamento dúctil dos corpos de prova, é apresentado na FIGURA 85, propõe como ocorre a divisão e dissipação de forças de tensão com o aumento no preenchimento interno da peça.

FIGURA 85 - DISSIPAÇÃO DE FORÇAS NOS FILAMENTOS DO PREENCHIMENTO INTERNO



FONTE: Adaptado KUI et al., (2020).

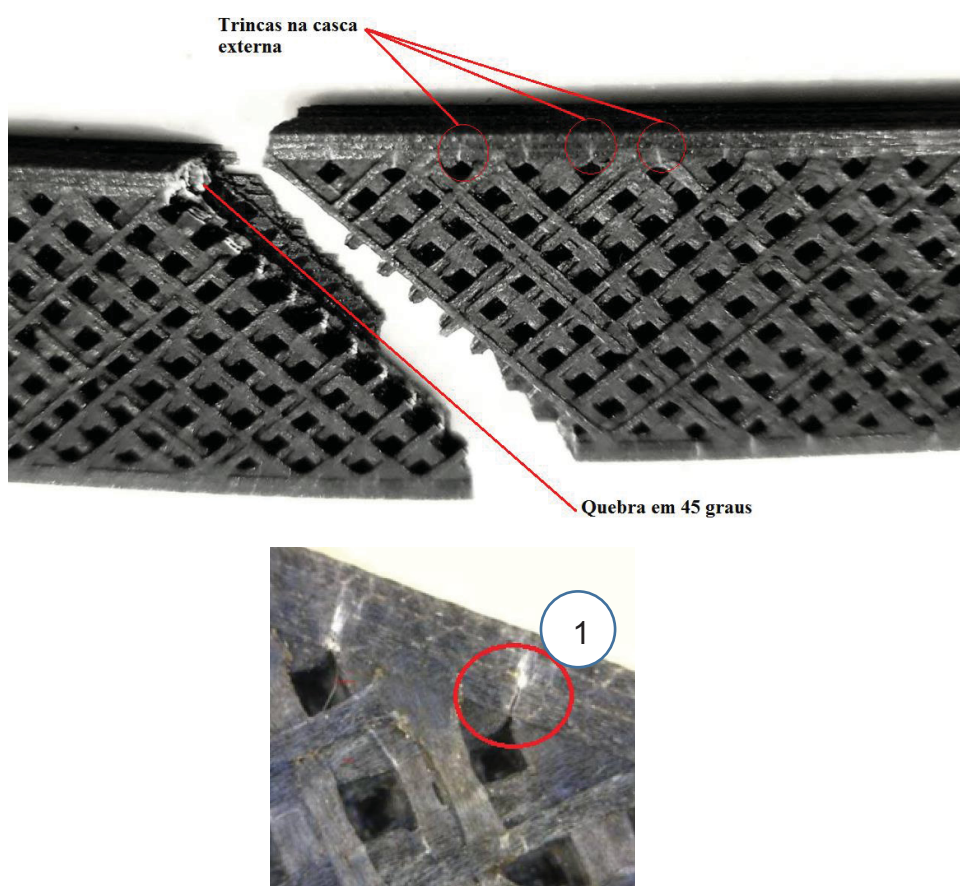
Neste caso, uma força de 20kN é simulada em todos os preenchimentos. Como há um aumento no número de paredes internas, com o aumento da densidade no *Slicer*, essas forças se dividem entre os filamentos. Isso sugere que há uma diminuição das forças atuando em cada filamento com o aumento da densidade de preenchimento escolhida.

Os triângulos depositados pelo preenchimento triangular são equiláteros, e os ângulos que eles formam são de 60 graus. Portanto para o preenchimento (1) com 5kN em cada nó tem-se uma força de tração de 2,16kN agindo em cada filamento interno e 2,5kN atuando no de perímetro agravando as tensões que induzem uma quebra frágil da casca. A força resultante no perímetro é maior pois na decomposição da força desse nó, é utilizado o cosseno de 0 graus, que é 1. No preenchimento (2) da mesma figura com 4kN em cada nó, tem-se 1,73kN em cada filamento interno e

2kN nos de perímetro. Para o preenchimento (3) tem-se 1,44kN atuando em cada filamento interno e 1,66kN nos perímetros. Isso confirma a diminuição das forças de tensão agindo em cada filamento com o aumento da densidade de preenchimento escolhida.

A FIGURA 86 mostra um corpo de prova com preenchimento Octeto com 50% de densidade que foi impresso sem as camadas superiores, de modo a analisar a diferença entre o comportamento mecânico da casca e do preenchimento após a ruptura no ensaio de tração.

FIGURA 86 - TRINCAS NO PERÍMETRO DO CORPO DE PROVA OCTETO COM 50% DE DENSIDADE

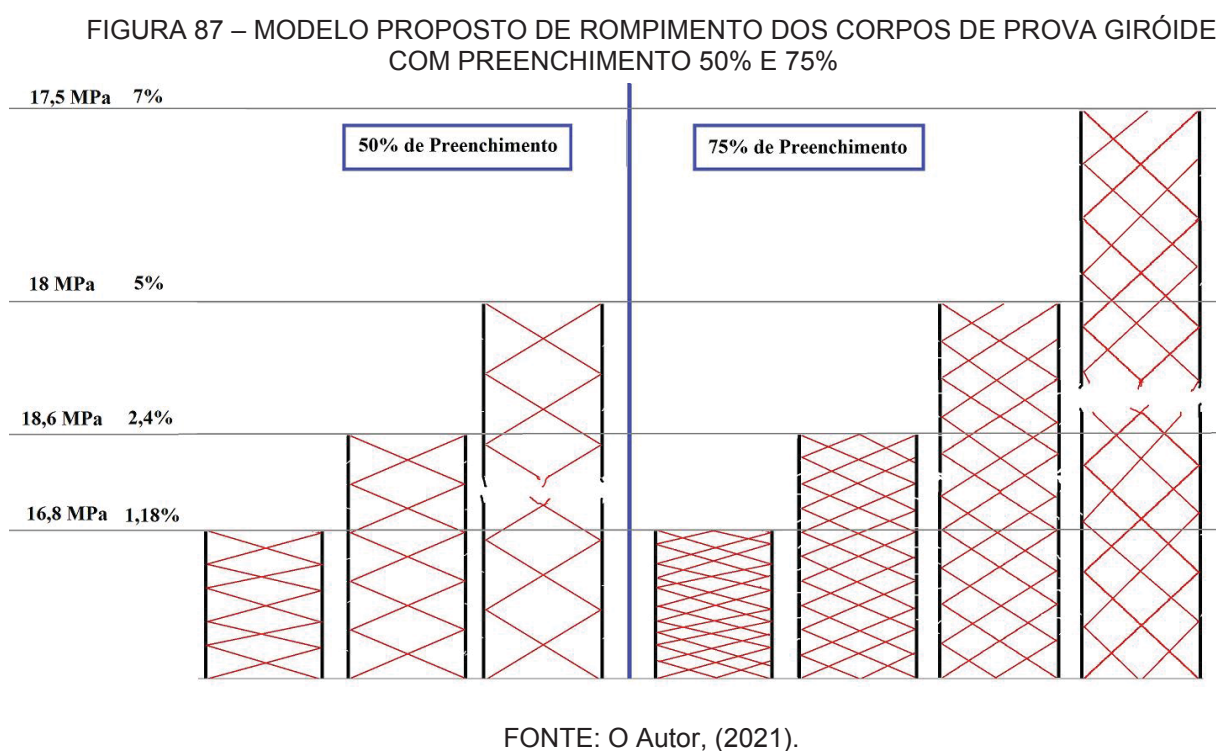


FONTE: O Autor, (2021).

Pode ser observado a presença de várias trincas no perímetro externo (casca) do corpo de prova. Isso provavelmente ocorre pelo comportamento frágil, dado pelo comportamento frágil do material PLA-fibra de carbono, da casca em contraste com o

comportamento dúctil do preenchimento evidenciado por regiões aparentemente alongada na região do preenchimento. Também é observado que as trincas iniciam no perímetro (1) em posições onde há um vazio do preenchimento, e que elas não chegam até a superfície externa da casca, portanto são visíveis apenas nessa amostra aberta.

A FIGURA 87 mostra propõem um modelo de como ocorre o rompimento das amostras, utilizando como base os dados das curvas Tensão x Deformação das amostras Giróide de 50% e 75% de preenchimento.



A partir de aproximadamente 1,18% de deformação inicia-se as trincas e ocorre o rompimento da casca dos corpos de prova com Tensão de 16,8 MPa (aproximado). A resistência máxima é alcançada com 2,4% de deformação (aproximado em Tensão Máxima de 18,6MPa). A partir de 2,4%, duas situações são observadas. Para 50% de densidade de preenchimento a deformação continua até 5% e então ocorre a ruptura da amostra. Para 75% a deformação continua até atingir 6,89%. Pode-se notar claramente o aumento da capacidade de alongamento antes da ruptura dos corpos

de prova com 75% de preenchimento em relação aos de 50%. Apesar de os dois ainda suportarem aproximadamente a mesma tensão máxima.

5. CONCLUSÕES FINAIS

Neste trabalho, as propriedades de corpos de prova impressos em uma impressora 3D do tipo FDM foram caracterizadas através de ensaios de tração, conforme norma ASTM D618, de modo a determinar os valores de a tensão máxima, alongamento máximo e limite de escoamento. Foram fabricados 27 corpos de prova utilizando a matéria prima PLA-fibra de carbono, nas densidades de 25%, 50% e 75%, nos tipos de preenchimento Octeto, Cúbico e Giróide, disponíveis no *slicer* CURA. Essas amostras foram ensaiadas em um laboratório especializado.

Baseado nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Nos corpos de prova com 25% de preenchimento a fratura ocorre de modo frágil, e com o aumento da densidade de preenchimento (50% e 75%) há um aumento não linear da ductilidade do material.
- Também foi observado que a fratura da casca dos corpos de prova provavelmente ocorre quando a amostra atinge 1,18% de deformação. O maior alongamento, de 6,89%, foi obtido com o preenchimento Giróide, provavelmente devido à maneira com que as forças de tensão são dissipadas através do seu formato ondulado. As amostras com densidade de 50% foram as que obtiveram o maior valor de tensão máxima específica [MPa/g], e as com 75% de densidade obtiveram os melhores resultados de tenacidade específica [Mpa/g] [MJ/g²*mm³], com destaque para o tipo de preenchimento Giróide. A tensão máxima obtida foi de 18,75 Mpa no corpo de prova com preenchimento Cúbico e 75% de densidade, porém todos as amostras com 50% e 75% de densidade em todos os tipos de preenchimentos atingiram próximo desse valor com menos de 2% de variação.

Para projetos de engenharia ou amadores onde for necessário imprimir peças com demanda de esforço semelhante, esse trabalho pode ajudar na seleção dos parâmetros e fabricação e impressão dessas peças. Como por exemplo em alguma situação onde for necessário o içamento de algum material ou peça, o

desenvolvimento de um dispositivo de içamento que será submetido à tração poderá ser aprimorado com os resultados apresentados nesse trabalho. Ou também para uma aplicação de guincho ou reboque onde o engate ou gancho estará submetido ao esforço de tração.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros teriam três itens que seriam muito propícios a serem estudados de modo a dar continuidade ao trabalho de caracterização e otimização de peças impressas em 3D para resistência à tração. Sendo eles:

- Aquecimento pré-deposição. Utilizando um sistema composto por um bico fixado no cabeçote de impressão direcionando ar quente à peça sendo impressa imediatamente na região onde o filamento será depositado. Efetuar a impressão de amostras na posição vertical e horizontal com temperaturas de sopro diferentes. Posteriormente fazer ensaio de tração nos corpos de prova para verificar se a temperatura adicional aquecendo a peça antes da deposição da nova camada de filamento melhorou a difusão e adesão entre os filamentos, e consequentemente sua resistência máxima à tração.
- Alteração do G-code visando resistência a tração. Fazer modificações no código g-code das amostras de modo a alinhar os filamentos do preenchimento no sentido das forças de tração que serão efetuadas. Poderiam ser utilizados preenchimentos com mais linhas retas, e outros mais ondulados. Focando na divisão de forças que ocorre com o aumento da quantidade de paredes internas e não em sua espessura.
- Melhoria da ruptura frágil da casca. Rupturas frágeis são péssimas em corpos com demanda estrutural pois são catastróficas quando ocorrem. De modo a melhorar esse comportamento observado nas cascas dos corpos de prova estudados, poderia ser impresso amostras com perímetro em pequenos zigue-zagues invés de linhas retilíneas. E

posteriormente analisar o comportamento dessas peças em ensaios de tração.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL Sarvesh K., Naomi Sanabria-DeLong, Gregory N. Tew, and Surita R. Bhatia. **Structural Characterization of PLA-PEO-PLA Solutions and Hydrogels: Crystalline vs Amorphous PLA Domains.** *Macromolecules* 2008, 41, 5, 1774–1784

ASTM D638-14:2014. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2014.

BOGUE, R. **3D printing the dawn of a new era in manufacturing.** Emerald Insight, 2013.

BOTEAN Adrian. **Thermal expansion coefficient determination of polylactic acid using digital image correlation** - Ioan E3S Web of Conferences 32, 01007 (2018) 20183201007 EENVIRO 2017

CABREIRA, Vinicius; Ruth Marlene Santana. **Effect of infill pattern in Fused Filament Fabrication (FFF) 3D Printing on materials performance.** *Matéria (Rio J.)* vol.25 no.3, Rio de Janeiro 2020. Epub Sep 16, 2020

CAIN, Perry. **Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D printing.** 2019

CALIGNANO, Flaviana; MASSIMO Lorusso; IGNANIO Roppolo; PAOLO Minetola. **Investigation of the Mechanical Properties of a Carbon Fibre-Reinforced Nylon Filament for 3D Printing.** *Machines* 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-1702/8/3/52>. Acesso em: 13 jan.2021.

CALLISTER, William D. cap. **Tenacidade.** *Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução –Sétima Edição*

CORRAL, Irene; Ali Bagheri, Alejandro Dominguez, Ramón Casado. **Influence of infill and nozzle diameter on porosity of FDM printed parts with rectilinear grid pattern.** *Procedia Manufacturing* Volume 41, Pages 288-295. 2019

CHACÓN, J.M.; Caminero, M.A.; García-Plaza, E.; Núñez, P.J. **Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection.** *Mater. Des.* 124, 143–157. 2017

CHOI, J.W.; Wicker, R.; Lee, S.H.; Choi, K.H.; Ha, C.S.; Chung, I. **Fabrication of 3D biocompatible/biodegradable micro-scaffolds using dynamic mask projection microstereolithography.** *J. Mater. Process. Technol.* 2009, 209, 5494–5503

DECKARD, C.R. **Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering**. U.S. Patent 4863538, 5 September 1989.

DDDROD **Closed Versus Open Systems**. Disponível em: <https://dddrod.com/blog/closed-versus-open-systems/>. Acessado em abril de 2021.

DOMÍNGUEZ García, A., Claver, J., Camacho, Sebastián. **M.A.Considerations on the applicability of test methods for mechanical characterization of materials manufactured by FDM**. "Materials v13 (1), 28". 2020

DUTTA, D.; Prinz, F.B.; Rosen, D.; Weiss, L. **Layered Manufacturing: Current Status and Future Trends**. J. Comput. Inf. Sci. Eng. 1, 60–71. 2001

EYNDE Michael Van den, Peter Van Puyvelde. **3D Printing of Poly(lactic acid)**. Industrial Applications of Poly(lactic acid) pp 139-158. 2017

FERNANDEZ-VICENTE, Miguel, Wilson Calle, Santiago Ferrandiz, and Andres Conejero. **Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing**. 3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING Volume 3, Number 3, 2016.

Filament2print. **Sistemas de Extrusão Direta e Bowden**. Disponível em: https://filament2print.com/pt/blog/94_extrusao-directa-bowden.html. Acessado em abril de 2021.

GARG A, Bhattacharya A, Batish. **Chemical vapor treatment**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Volume 89, pages 2175–2191(2017)

GOLDSCHMIDT Benjamin. **The Best Cura Infill Pattern (for Your Needs)**. All 3DP, 2020.Disponível em: <https://all3dp.com/>. Acesso em: 03 mar. 2020.

GOTHAIT H. **Apparatus and Method for Three-Dimensional Model Printing**. U.S. Patent 6259962. 2001

HERNANDEZ, Garzon S., D. Garcia Gonzalez, A. Jerusalém, A. Arias. **Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties**. Material & Design. Volume 188, March 2020

HULL, C. W.; ARCADIA, C. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**. U.S. Patent Documents, 1986.

HÜSEYİN KÜRŞAD SEZER* , OĞULCAN EREN , HÜSEYİN RIZA BÖRKLÜ , VEYSEL ÖZDEMİR **Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties**. 2019. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 34(2), pp. 663-674. 2019

ISO 527-2:2012. **Plastics-Determination of Tensile Properties-Part 2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics**; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2012.

KIENDL Josef, Chao Gao. **Controlling toughness and strength of FDM 3D-printed PLA components through the raster layup**. Composites Part B 180, 2019.

KOTZ Samuel; Norman L. Johnson. **Delicate Relations Among The Basic Process Capability Indices C_p , C_{pk} and C_{pm} , And Their Modifications**. Communications in Statistics - Simulation and Computation Volume 28, 1999 -Issue 3 Pages 849-866. 2007.

KONODO Hironori. **3D Print Speed: The Perfect Settings for PLA & More**. Disponível em: <https://all3dp.com/2/3d-printing-speed-optimal-settings/>. Acessado em abril 2021.

KUI Wang , Xun Xiea , Jin Wanga , Andong Zhaoa , Yong Penga,b,c , Yanni Rao. **Effects of infill characteristics and strain rate on the deformation and failure properties of additively manufactured polyamide-based composite structures**. Results in Physics 2020

LARS Sthle, Svante Wold. **Analysis of variance (ANOVA)**. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems Volume 6, Issue 4, Pages 259-272. November 1989.

LIU K., M.R. Piggott. **Shear strenght of polymers and fibre composites:1. Thermoplastic and thermoset polymers**. Composites, volume 26, issue 12, December 1995, pages 829-840.

LISELI Baich; Guha Manogharan; Hazel Marie. **Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts**. International Journal of Rapid Manufacturing, Volume 5, Issue 3-4, 2016.

LOVO, João Fiore Parreira, Carlos Alberto Fortulan. **Estudo De Propriedades Mecânicas E Anisotropia Em Peças Fabricadas Por Manufatura Aditiva Tipo FDM**. Mechchanical strength. Int J AdvManuf Technol 89(5–8):2175–2191. 2017

NGO, T. D.; KASHANI, A.; IMBALZANO G.; NGUYEN, K. T.Q.; HUI, D. **Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges**. Composites Part B, v. 143, p. 172–196, 2018.

OSWALDO FILIZOLA. **Máquina Universal de Ensaio**. Disponível em: <http://oswaldofilizola.com.br/ame2kn.html>. Acessado em junho de 2020.

PANES, Rodríguez-, A.; Claver, J.; Camacho, A.M.; Sebastián, M.A. **Análisis normativo y evaluación geométrica de probetas para la caracterización mecánica de piezas obtenidas por fabricación aditiva mediante FDM**. In Actas del XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica; Pedrero, J.I., Ed.; UNED: Madrid, Spain, 2018.

PERTUZ, A.D., Díaz-Cardona, S., González-Estrada. **Static and fatigue behaviour of continuous fibre reinforced thermoplastic composites manufactured by fused deposition modelling technique**. International Journal of Fatigue v130, 105275. 2020

POPESCU, D.; Zapciu, A.; Amza, C.; Baci, F.; Marinescu, R. **FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review**. Polymeric Tests, 69, 157–166. 2018

QUEIROZ, Denise Placco. **Diagrama de fases, propriedades térmicas e morfológicas de blendas de poliácido láctico e polimetacrilato de metila**. Instituto de Química III. 2000

RAO V. Durga Prasada, P. Rajiv, V. Navya Geethika. **Effect of fused deposition modelling (FDM) process parameters on tensile strength of carbon fibre PLA**. Materials Today: Proceedings 18 (2019) 2012–2018

RODRIGUES, V. P.; Zancul, De S.E.; Mançanares, G. C.; Giordano, M. C.; Salerno, S. M. **Additive manufacturing: state-of-the-art and application framework**, 2017.

RHYS Jones, Patrick Haufe, Edward Sells, Pejman Iravani. **RepRap – the replicating rapid prototyper**. Robotica, volume 29 Special Issue 1. 2011

RUCHERT, Cassius. **Ensaio de Tração em Polímeros**. Escola de engenharia de São Carlos. USP 2019

SCHIAVONE Nicola, Vincent Verney, Haroutioun Askanian. **Effect of 3D Printing Temperature Profile on Polymer Materials Behavior**. 3D Printing and Additive Manufacturing Vol. 7, No. 6. 2020.

SERIGHELLI Henrique Gwiggner, Cristiano José TURRA, David Roza JOSÉ **Método Numérico Para A Determinação Do Módulo De Tenacidade De Materiais A Partir De Ensaio De Tração**: IX MICTI 2016

SHILPESH R. Rajpurohit, Harshit K. Dave. **Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part**. Rapid Prototyping Journal. 2018

SILVA, F. L. F., et al. **Comportamento em Tração de PLA e ABS Produzidos por Manufatura Aditiva**. Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, v. 46, n. 2, p. 31, 2018. ISSN: 1518-9082. 2020.

SINTETIZE 3D da ideia a concepção Disponível em: <https://sintetize3d.lojaintegrada.com.br/>. Acessado em: 15 Nov 2020.

STRATASYS. Investors. **Press Releases**. Stratasys Ltd, 2021 Disponível em: <https://www.stratasys.com/>. Acesso em: 10 Jan.2021

SULAVIK, C.; WALLER, T. **3D Printing comes of age in US industrial Manufacturing**. PwC and Manufacturing Institute, 2016.

SWETHAM, Thirunahary; Ketham Madhana; Akhil Huggi, Mavoori Kumar. **A critical review of 3d printed materials and details of materials used in FDM**. IJSRSET | Volume 3 | Issue 2 | Print ISSN: 2395-1990. 2017

TORK. Disponível em: <https://laboratorios-tork.com.br>. Acesso em abril de 2021

TOPINK 3D. Disponível em: <https://www.topink3d.com.br/>. Acesso em abril de 2021.

TSUJI, Hideto. **Poly (lactide) stereocomplexes: formation, structure, properties, degradation, and applications**. Elsevier. Poli-Lactides p7. 2007

TURNER, Brain Neil, Rober Strong, Scott Gold. **A Review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling**. Rapid Prototyping Journal 20. DOI: 10.1108. April 2014

TÜRKMEN, Süleyman; Kadir Günaydın; Prof. Dr. Halit **COMMON FDM 3D PRINTING DEFECTS**. ResearchGate International 3D Congress. 2018

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D** [livro eletrônico]. São Paulo: Ed. Blucher, 2017.

WAHEED, Sidra ab, Joan M. Cabot ab, Niall P. Macdonald ab, Trevor Lewis b, Rosanne M. Guijt c, Brett Paull ab and Michael C. Breadmore **3D printed microfluidic devices: enablers and barriers**. 2016

WANG, Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; Ramani, K.; Chen, Y.; Williams, C. B.; C. C.L.; Shin, Y. C.; Zhang, S.; Zavattieri, P. D. **The status, challenges, and future of additive manufacturing in Engineering**. Computer-Aided Design v. 69 p. 65–89, 2015.

YUANYUAN Xu, Xiaoyue Wu, Xiao Guo, Bin Kong, Min Zhang, Xiang Qian Shengli Mi, Wei Sun. **The Boom in 3D-Printed Sensor Technology**. Sensors. 2017

ZHAOBING, Liu; Qian Lei; Shuaiqi Xing. **Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM**. 2019

3D Parts. Disponível em: <https://www.3dparts.co.uk/how-it-works/>. Acessado em abril de 2021.

ANEXOS

Giróide 25%

TORK

LABORATÓRIOS

DE MATERIAIS

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 21014718 SVSP – Rev. 1

FL 11

Empresa interessada : JOÃO FELIPE MARTINS

Pedido de ensaio : 289565

Número do trabalho : ENSAIO DE TRAÇÃO

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

INSPEÇÃO / DATA : 07/01/2021 - Ensaio no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO : Gyrod 25%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS : 03 amostras de peça impressas em 3D com material de PLA + Fibras de Carbono

PROPOSTA TORK Nº : 2009003C-REV.1

CEI 0091

LABORATÓRIOS

DE MATERIAIS

TORK

LABORATÓRIOS

DE MATERIAIS

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 21014718 SVSP – Rev. 1

FL 11

Empresa interessada : JOÃO FELIPE MARTINS

Pedido de ensaio : 289565

Número do trabalho : ENSAIO DE TRAÇÃO

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

INSPEÇÃO / DATA : 07/01/2021 - Ensaio no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO : Gyrod 25%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS : 03 amostras de peça impressas em 3D com material de PLA + Fibras de Carbono

PROPOSTA TORK Nº : 2009003C-REV.1

CEI 0091

LABORATÓRIOS

DE MATERIAIS

INSPEÇÃO / DATA : 07/01/2021 - Ensaio no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO : Gyrod 25%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS : 03 amostras de peça impressas em 3D com material de PLA + Fibras de Carbono

PROPOSTA TORK Nº : 2009003C-REV.1

INSPEÇÃO / DATA : 07/01/2021 - Ensaio no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO : Gyrod 25%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS : 03 amostras de peça impressas em 3D com material de PLA + Fibras de Carbono

PROPOSTA TORK Nº : 2009003C-REV.1

I - ENSAIO DE TRAÇÃO

ENSAIO DE TRAÇÃO						
CP	Dimensões	Seção ¹	Limite de Ruptura	Alongamento na Ruptura	Módulo	
	mm	mm ²	N	MPa	mm	%
11	18,936 x 9,992	189,209	2.252	11,90	0,651	1,302
12	18,929 x 9,909	187,567	2.298	12,25	0,677	1,354
19 ²	18,922 x 9,904	187,403	2.227	11,88	0,655	1,310
Média	--	--	--	12,01	0,661	1,322
Desvio Padrão	--	--	--	0,208	0,0140	0,0280
						116,440

Nota¹: A seção transversal corresponde às dimensões externas dos corpos de prova, sem considerar as configurações de preenchimento interno.

Nota²: A maior deformação do corpo de prova 19, ocorreu pelo encurtamento do extensômetro.

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

- 1- Procedimento: Tork P-838.
- 2- Ensaio realizado conforme: Norma ASTM D638, ed. 2014.
- 3- Ensaio realizado a uma temperatura ambiente (23 ± 2) °C.
- 4- Local do Ensaio: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - Barra Funda - São Paulo / SP - Laboratório de Produtos.
- 5- Revisão 1: Foi inserido um anexo com o gráfico, conforme solicitação do cliente via e-mail em 22/01/2021, sendo que este cancela e substitui o Relatório de Ensaio Nº 21014718 SVSP.
- 6- Equipamentos utilizados:
Tensiómetro Digital: Identificação Tork 4833 - Certificado RBC/ABSI CAL 18139820 - válido até 03/2021
Máq. universal de ensaio: Identificação Tork 4986 - Certificado RBC/Duamex DINTT 2116230 - válido até 08/2021
Máq. universal de ensaio: Identificação Tork 4986 - Certificado RBC/Duamex DINTT 2116230 - válido até 08/2021
Extensômetro Eletrônico Barra Deformação: Identificação Tork 5339 - Certificado RBC/Duamex DINTT 2116230 - válido até 08/2021

Data do Ensaio: de 18 a 19 de Janeiro de 2021.

Emissão do Relatório: São Paulo, 25 de Janeiro de 2021.

Eng. Bruno S. R. de Oliveira - CREA 340562/8078
Chefe do Laboratório de Testes em Produtos

Eng. Leopoldo Rosalim de Oliveira - CREA 0600318910
Gerente Técnico do Laboratório Tork SP

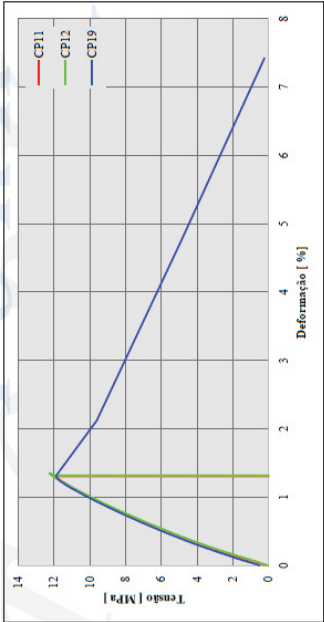
Laboratório de Ensaio acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob o número CEL-4891.

Os resultados aqui apresentados são válidos para o objeto ensaiado em laboratório. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

BR-0032-19 - Rev.01

TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA.
TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP:01137-000 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br

GRÁFICO - TRAÇÃO



Laboratório de Ensaio acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob o número CEL-4891.

Os resultados aqui apresentados são válidos para o objeto ensaiado em laboratório. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

BR-0032-19 - Rev.01

TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA.
TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP:01137-000 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br

TORK

LABORATÓRIO DE ENSAIO

DE MATERIAIS LTDA

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 21014719 SVSP – Rev. 1

FL 1/1

Empresa interessada : JOÃO FELIPE MARTINS

Pedido de ensaio : 289565

Natureza do trabalho : ENSAIO DE TRACÇÃO

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

INSPEÇÃO / DATA : 07/01/2021 – Entregue no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO : Gyroid 50%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS : 03 amostras de peças impressas em 3D com material de PLA + Fibras de Carbono

PROPOSTA TORK Nº : 2009003C-REV.1

ENSAIO DE TRACÇÃO

CP

Dimensões

mm

Seção

mm²

Carga Máxima

N

MPa

Alongamento na Carga Máxima

mm

%

N

MPa

Limite de Ruptura

N

MPa

Alongamento na Ruptura

mm

%

Módulo

MPa

I - ENSAIO DE TRACÇÃO

ENSAIO DE TRACÇÃO												
CP	Dimensões	Seção	Carga Máxima	Alongamento na Carga Máxima	Limite de Ruptura	Alongamento na Ruptura	Módulo					
	mm	mm²	N	MPa	mm	%	N	MPa	mm	%	MPa	
22	19,019 × 9,961	189,448	3.392	17,90	1,141	2,282	3.030	15,99	5,305	10,610	1,628	
23	19,027 × 9,968	189,661	3.576	18,86	1,066	2,132	3.262	17,20	4,617	9,234	1,712	
24	19,010 × 9,964	189,416	3.602	19,02	1,151	2,302	3.286	17,35	4,669	9,338	1,564	
Média	--	--	--	18,59	1,119	2,239	--	16,85	3,856	7,959	1,635	
Desvio Padrão	--	--	--	0,6038	0,0929	0,0929	--	141,38	1,3634	2,2990	74,225	

Nota: A seção transversal corresponde as dimensões externas dos corpos de prova, sem considerar as configurações de preenchimento interno.

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

- 1- Procedimentos: Tork P-358.
- 2- Ensaio realizado conforme: Norma ASTM D638, ed. 2014.
- 3- Ensaio realizado a uma temperatura ambiente (23 ± 2) °C.
- 4- Local do Ensaio: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - Barra Funda - São Paulo / SP - Laboratório de Produtos.
- 5- Revisão 1: Foi inserido um anexo com o gráfico, conforme solicitação do cliente via e-mail em 22/01/2021, sendo que este cancela e substitui o Relatório de Ensaio N° 21014719 SVSP.
- 6- Equipamentos utilizados:
 - Termômetro Digital: Identificação Tork 4833 - Certificado RBC/ABSI CAL 183389/20 - válido até 03/2021
 - Máq. universal de ensaio: Identificação Tork 4868 - Certificado RBC/Diagnose DNT7215c/20 - válido até 08/2021
 - Celula de Carga N°: Identificação Tork 4871 - Certificado RBC/Diagnose DNT7215c/20 - válido até 08/2021
 - Alimentador eletrônico Barra Funda: Identificação Tork 3339 - Certificado RBC/Diagnose DNT7214c/20 - válido até 08/2021

Bruno Ozi

Eng. Bruno Ozi S. R. de Oliveira – CREA 26056280/78

Gerente Técnico do Laboratório de Testes em Produtos

Eng. Leopoldo Rosalim de Oliveira – CREA 0600318910

Gerente Técnico do Laboratório Tork SP

LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MATERIAIS LTDA

LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MATERIAIS LTDA

LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MATERIAIS LTDA

DATA DO ENSAIO: 18 a 19 de Janeiro de 2021.

EMISSÃO DO RELATÓRIO: São Paulo, 25 de Janeiro de 2021.

Os resultados apresentados no presente documento têm validade somente no objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução ou qualquer outra forma de reprodução, sem nenhuma autorização, é proibida.

PR-003-2 - Rev.1

TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA

TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP 01137-000 - Tel/Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br

TORK BARRA FUNDADA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel/Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br

TORK

LABORATÓRIO DE ENSAIO

DE MATERIAIS LTDA

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 21014720 SVSP – Rev. 1

FL 1/1

Empresa interessada : JOÃO FELIPE MARTINS

Pedido de ensaio : 289565

ENSAIO DE TRACÇÃO

CP

Dimensões

mm

Seção

mm²

Carga Máxima

N

MPa

Alongamento na Carga Máxima

mm

%

N

MPa

Limite de Ruptura

N

MPa

Alongamento na Ruptura

mm

%

Módulo

MPa

GRÁFICO - TRACÇÃO

Os resultados apresentados no presente documento têm validade somente no objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução ou qualquer outra forma de reprodução, sem nenhuma autorização, é proibida.

PR-003-2 - Rev.1

TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA
TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP 01137-000 - Tel/Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDADA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel/Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br

TORK

LABORATÓRIO DE ENSAIO

DE MATERIAIS LTDA

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 21014720 SVSP – Rev. 1

FL 11

Empresa interessada : JOÃO FELIPE MARTINS

Pedido de ensaio : 289565

Natureza do trabalho : ENSAIO DE TRAÇÃO

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

INSPEÇÃO / DATA : 07/01/2021 - Entrega no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO : Goyrid 75%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS : 03 amostra de peças impressas em 3D com material da PLA + Fibra de Carbono

PROPOSTA TORK Nº : 209003C-REV.1

ENSAIO DE TRAÇÃO

CP

CP22

CP23

CP24

INSPEÇÃO / DATA : 07/01/2021 - Entrega no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO : Goyrid 75%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS : 03 amostra de peças impressas em 3D com material da PLA + Fibra de Carbono

PROPOSTA TORK Nº : 209003C-REV.1

I- ENSAIO DE TRAÇÃO

CP	Dimensões mm	Seção ¹ mm²	ENSAIO DE TRAÇÃO				Alongamento na Ruptura mm	Alongamento na Ruptura %	Módulo MPa
			Carga Máxima N	Carga Máxima MPa	Limite de Ruptura MPa				
25	18,966 ± 9,888	187,832	3.469	18,47	1.223	2,446	3,290	17,52	3,064
26	19,004 ± 9,923	188,577	3.489	18,50	1,209	2,418	3,285	17,42	2,739
27	19,031 ± 9,912	188,655	3.582	18,99	1,184	2,368	3,373	17,88	2,617
Média	--	--	--	18,65	1,205	2,411	--	17,61	2,807
Desvio Padrão	--	--	--	0,292	0,0198	0,0395	--	0,242	0,2311

Nota: A seção transversal corresponde as dimensões externas dos corpos de prova, sem considerar as configurações de preenchimento interno.

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

- 1- Procedimentos Tork P-558.
- 2- Ensaio realizado conforme: Norma ASTM D638, ed. 2014.
- 3- Ensaio realizado a uma temperatura ambiente (23 ± 2) °C.
- 4- Local do Ensaio: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - Barra Funda - São Paulo / SP - Laboratório de Produtos.
- 5- Revisão 1: Foi inserido um anexo com o gráfico, conforme solicitação do cliente via e-mail em 22/01/2021, sendo que este anexa e substitui o Relatório de Ensaio Nº 21014720 SVSP.
- 6- Equipamento utilizados:

Instrumento Digital Identificação Tork 4833 - Certificado EBC-ABSI CAL 1839820 - válido até 03/2021
Equipamento de Ensaio Identificação Tork 4871 - Certificado EBC-ABSI CAL 1839820 - válido até 03/2021
Célula de Carga 5KN Identificação Tork 4871 - Certificado EBC-Dinamex DNTT/015220 - válido até 08/2021
Exatimetro Eletrônico Barra Deformação Identificação Tork 5339 - Certificado EBC-Dinamex DNTT/014620 - válido até 08/2022

Data dos Ensaio: de 18 a 19 de Janeiro de 2021.
Emissão do Relatório: 25 de Janeiro de 2021.

Eng. Bruno O. S. R. de Oliveira - CREA 349543/8078
Chefe do Laboratório de Têxteis em Produtos
Eng. Leopoldo Rosalim de Oliveira - CREA 040031/8910
Gerente Técnico do Laboratório Tork SP

Laboratório de Ensaio acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CR-0891.
Os resultados apresentados no presente documento têm validade restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

BR 0891 - 004

TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA.
TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP 01137-000 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br

TORK

LABORATÓRIO DE ENSAIO

DE MATERIAIS LTDA

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 21014719 SVSP – Rev. 1

FL 11

Empresa interessada : JOÃO FELIPE MARTINS

Pedido de ensaio : 289565

Natureza do trabalho : ENSAIO DE TRAÇÃO

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

INSPEÇÃO / DATA : 07/01/2021 - Entrega no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO : Goyrid 75%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS : 03 amostra de peças impressas em 3D com material da PLA + Fibra de Carbono

PROPOSTA TORK Nº : 209003C-REV.1

ENSAIO DE TRAÇÃO

CP

CP22

CP23

CP24

INSPEÇÃO / DATA : 07/01/2021 - Entrega no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO : Goyrid 75%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS : 03 amostra de peças impressas em 3D com material da PLA + Fibra de Carbono

PROPOSTA TORK Nº : 209003C-REV.1

GRÁFICO - TRAÇÃO

Laboratório de Ensaio acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CR-0891.
Os resultados apresentados no presente documento têm validade restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

BR 0891 - 004

TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA.
TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP 01137-000 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br

Octet 25%

TORK

LABORATÓRIO DE ENSAIO

CONFORME ABNT NBR ISO/IEC 17025

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 21014721 SVSP – Rev. 1

FL 1/1

Empresa interessada : JOÃO FELIPE MARTINS

Pedido de ensaio : 289565

Natureza do trabalho : ENSAIO DE TRACÇÃO

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

INSPEÇÃO / DATA : 07/01/2021 - Entrega no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO : Octet 25%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS : 03 amostras de peças impressas em 3D com material de PLA + Fibra de Carbono

PROPOSTA TORK Nº : 2009003C-REV.1

CP01

CP02

CP03

CP04

CP05

CP06

CP07

CP08

CP09

CP10

CP11

CP12

CP13

CP14

CP15

CP16

CP17

CP18

CP19

CP20

CP21

CP22

CP23

CP24

CP25

CP26

CP27

CP28

CP29

CP30

CP31

CP32

CP33

CP34

CP35

CP36

CP37

CP38

CP39

CP40

CP41

CP42

CP43

CP44

CP45

CP46

CP47

CP48

CP49

CP50

CP51

CP52

CP53

CP54

CP55

CP56

CP57

CP58

CP59

CP60

CP61

CP62

CP63

CP64

CP65

CP66

CP67

CP68

CP69

CP70

CP71

CP72

CP73

CP74

CP75

CP76

CP77

CP78

CP79

CP80

CP81

CP82

CP83

CP84

CP85

CP86

CP87

CP88

CP89

CP90

CP91

CP92

CP93

CP94

CP95

CP96

CP97

CP98

CP99

CP100

I - ENSAIO DE TRACÇÃO

CP	Dimensões mm	ENSAIO DE TRACÇÃO					
		Seção ¹ mm²	Limite de Ruptura MPa	Alongamento na Ruptura mm	Módulo MPa		
01	19,340 x 9,822	191,118	1.540	8,06	1,072	2,144	460
02	19,012 x 9,874	187,724	1.694	9,02	0,427	0,854	1.169
03	19,009 x 9,879	187,790	1.954	10,40	0,525	1,050	1.131
Média	--	--	--	9,16	0,675	1,349	920
Desvio Padrão	--	--	--	1,176	0,3476	0,6951	398,825

Nota¹: A seção transversal corresponde as dimensões externas dos corpos de prova, sem considerar as configurações de preenchimento interno.

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

- Procedimento: Tork P-838.
- Ensaio realizado conforme: Norma ASTM/D638, ed. 2014.
- Ensaio realizado: a uma temperatura ambiente (23 ± 2) °C.
- Local do Ensaio: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - Barra Funda - São Paulo / SP - Laboratório de Produtos.
- Revisão 1: Foi inserido um anexo com o gráfico, conforme solicitação do cliente via e-mail em 22/01/2021, sendo que este cancela e substitui o Relatório de Ensaio Nº 21014721 SVSP.
- Equipamentos utilizados:

Equipamento Digital Identificação Tork 4833 - Certificado REC/ABNT CAL 18338/20 - válido até 03/2021
Equipamento Digital Identificação Tork 4834 - Certificado REC/ABNT CAL 18339/20 - válido até 03/2021
Equipamento Digital Identificação Tork 4871 - Certificado REC/Diagnose DNTT/214/20 - válido até 08/2021
Equipamento Digital Identificação Tork 5338 - Certificado REC/Diagnose DNTT/214/20 - válido até 08/2022

Data dos Ensaio: de 18 a 19 de Janeiro de 2021.
Emissão do Relatório: São Paulo, 25 de Janeiro de 2021.


Eng. Bruno Ozi S. R. de Oliveira – CREA 26056280/78
Chefe do Laboratório de Testes em Produtos

Eng. Leopoldo Rosalin de Oliveira – CREA 0600318910
Gerente Técnico do Laboratório Tork SP
Laboratório de Ensaio acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL-4891.
Os resultados apresentados no presente documento têm significação restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

RP-483.2 - Rev.0

PA

TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA.
TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP 01137-000 - Tel/Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel/Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br

TORK

LABORATÓRIO DE ENSAIO

CONFORME ABNT NBR ISO/IEC 17025

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 21014721 SVSP – Rev. 1

FL 1/1

Empresa interessada : JOÃO FELIPE MARTINS

Pedido de ensaio : 289565

Natureza do trabalho : ENSAIO DE TRACÇÃO

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

INSPEÇÃO / DATA : 07/01/2021 - Entrega no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO : Octet 25%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS : 03 amostras de peças impressas em 3D com material de PLA + Fibra de Carbono

PROPOSTA TORK Nº : 2009003C-REV.1

CP01

CP02

CP03

CP04

CP05

CP06

CP07

CP08

CP09

CP10

CP11

CP12

CP13

CP14

CP15

CP16

CP17

CP18

CP19

CP20

CP21

CP22

CP23

CP24

CP25

CP26

CP27

CP28

CP29

CP30

CP31

CP32

CP33

CP34

CP35

CP36

CP37

CP38

CP39

CP40

CP41

CP42

CP43

CP44

CP45

CP46

CP47

CP48

CP49

CP50

CP51

CP52

CP53

CP54

CP55

CP56

CP57

CP58

CP59

CP60

CP61

CP62

CP63

CP64

CP65

CP66

CP67

CP68

CP69

CP70

CP71

CP72

CP73

CP74

CP75

CP76

CP77

CP78

CP79

CP80

CP81

CP82

CP83

CP84

CP85

CP86

CP87

CP88

CP89

CP90

CP91

CP92

CP93

CP94

CP95

CP96

CP97

CP98

CP99

CP100

Laboratório de Ensaio acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL-4891.
Os resultados apresentados no presente documento têm significação restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

RP-483.2 - Rev.0

PA

TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA.
TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP 01137-000 - Tel/Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel/Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br

TORK

LABORATÓRIOS DE ENSAIO

Empresa interessada: JOÃO FELIPE MARTINS

Pedido de ensaio : 289565

Natureza do trabalho : ENSAIO DE TRAÇÃO

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

INSPEÇÃO / DATA: 07/01/2021 - Entregue no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO: Octet 50%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS: 03 amostras de peças impressas em 3D com material de PLA + Fibra de Carbono

PROPOSTA TORK N°: 2009003C-REV.1

RELATÓRIO DE ENSAIO N°: 21014722 SVSP - Rev. 1

FL 1/1

Ensaio Tork
LABORATÓRIOS DE ENSAIO

CRL 0891

TORK

LABORATÓRIOS DE ENSAIO

Empresa interessada: JOÃO FELIPE MARTINS

Pedido de ensaio : 289565

RELATÓRIO DE ENSAIO N°: 21014722 SVSP - Rev. 1

FL 1/1

Ensaio Tork
LABORATÓRIOS DE ENSAIO

CRL 0891

GRÁFICO - TRAÇÃO

1- ENSAIO DE TRAÇÃO

CP	Dimensões mm	Seção¹ mm²	Carga Máxima			Alongamento na Carga Máxima		Limite de Ruptura		Alongamento na Ruptura		Módulo MPa
			N	MPa	%	mm	%	N	MPa	mm	%	
04	19,016 x 9,962	189,457	3.479	18,36	1,074	2,148	3,378	17,83	1,372	2,744	1,276	
05	19,033 x 9,931	189,017	2,634	13,94	0,563	1,126	2,416	12,78	0,863	1,726	1,149	
06	19,032 x 9,951	189,387	2,697	14,24	0,571	1,142	2,609	13,78	0,633	1,246	1,203	
Média	--	--	--	15,51	0,736	1,472	--	14,80	0,853	1,705	1,209	
Desvio Padrão	--	--	--	2,4698	0,2927	0,3855	--	2,6741	0,4508	0,9015	63,736	

Not: ¹-A seção transversal corresponde às dimensões externas dos corpos de prova, sem considerar as configurações de preenchimento interno.

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

- 1- Procedimentos Tork P-858.
- 2- Ensaio realizado conforme: Norma ASTM D638, ed. 2014.
- 3- Ensaio realizado a uma temperatura ambiente (23 ± 2) °C.
- 4- Local do Ensaio: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - Barra Funda - São Paulo / SP - Laboratório de Produtos.
- 5- Revisão 1: Foi inserido um anexo com o gráfico, conforme solicitação do cliente via e-mail em 22/01/2021, sendo que este cancela e substitui o Relatório de Ensaio N° 21014722 SVSP.
- 6- Equipamentos utilizados:

Temperatura Digital: Identificação Tork 4833 - Certificado EBC/ABSI CAL 183388-20 - válido até 03/2021
Máx. universal de ensaio: Identificação Tork 4868 - Certificado EBC/Diagnóstico DNTT/215c/20 - válido até 08/2021
Célula de Carga 5kN: Identificação Tork 4871 - Certificado EBC/Diagnóstico DNTT/215c/20 - válido até 08/2021
Extensômetro Eletrônico 5kN: Identificação Tork 5339 - Certificado EBC/Diagnóstico DNTT/214c/20 - válido 08/2022

Data dos Ensaio: de 18 a 19 de Janeiro de 2021.
Emissão do Relatório: 25 de Janeiro de 2021.

Eng. Bruno Octavio S. R. de Oliveira - CREA 240546/8078
Chefe do Laboratório de Testes em Produtos.
Eng. Leopoldo Rosalin de Oliveira - CREA 0600318910
Gerente Técnico do Laboratório Tork SP

Os resultados apresentados no presente documento não significam garantia nem a aplicação somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução ou alteração sem autorização, sem nenhuma alteração.

PR 01812 - Rev.0

TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA.
TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP 01137-000 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tok@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tok@laboratorios-tork.com.br

PR

TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA.
TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP 01137-000 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tok@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tok@laboratorios-tork.com.br

Os resultados apresentados no presente documento não significam garantia nem a aplicação somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução ou alteração sem autorização, sem nenhuma alteração.

PR 01812 - Rev.0

160

Cúbico 25%

TORK

LABORATÓRIO DE ENSAIO

DE MATERIAIS LTDA.

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 21014715 SVSP - Rev. 1

FL 1/1

Empresa interessada: JOÃO FELIPE MARTINS

Pedido de ensaio : 289565

Natureza do trabalho : ENSAIO DE TRACÇÃO

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

INSPEÇÃO / DATA: 07/01/2021 - Enregue no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO: Cúbico 25%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS: 03 amostras de peça impressas em 3D com material de PLA + Fibra de Carbono

PROPOSTA TORK Nº: 2009003C-REV.1

LABORATÓRIO DE ENSAIO

DE MATERIAIS LTDA.

CRL 0891

FL 1/1

I- ENSAIO DE TRACÇÃO

CP	Dimensões mm	ENSAIO DE TRACÇÃO			Módulo		
		Seção ¹ mm²	Limite de Ruptura N	MPa			
10	19,013 x 9,805	186,422	1.927	10,34	0,483	0,966	1,209
20	19,008 x 9,827	186,792	1.914	10,25	0,473	0,946	1,220
21	19,028 x 9,798	186,436	1.857	9,96	0,458	0,916	1,164
Média	--	--	--	10,18	0,471	0,943	1,198
Desvio Padrão	--	--	--	0,199	0,0126	0,0252	29,670

Nota: A seção transversal corresponde as dimensões externas dos corpos de prova, sem considerar as configurações de preenchimento interno.

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

- 1- Procedimentos Tork P-838.
- 2- Ensaio realizado conforme: Norma ASTM D638, ed. 2014.
- 3- Ensaio realizado a uma temperatura ambiente (23 ± 2) °C.
- 4- Local do Ensaio: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - Barra Funda - São Paulo / SP - Laboratório de Produtos.
- 5- Revisão 1: Foi inserido um anexo com o gráfico, conforme solicitação do cliente via e-mail em 22/01/2021, sendo que este cancela e substitui o Relatório de Ensaio Nº 21014715 SVSP.
- 6- Equipamentos utilizados:

Testamento Digital: Identificação Tork 4833 - Certificado RBC/ABNT CAL 183388/20 - válido até 03/2021

Máx. universal de ensaio: Identificação Tork 4868 - Certificado RBC/Diagnose DNTT/215/20 - válido até 08/2021

Cabulo de Carga 3kN: Identificação Tork 4871 - Certificado RBC/Diagnose DNTT/215/20 - válido até 08/2021

Ensaio de Ensaio: Identificação Tork 5339 - Certificado RBC/Diagnose DNTT/214/20 - válido até 08/2021

Eng. Bruno Ota S. R. de Oliveira - CREA 260562/8078

Gerente Técnico do Laboratório Tork SP

Laboratório de Ensaio acreditado pela CCCR de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL-0891.

Os resultados apresentados no presente documento têm validade restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Eng. Leopoldo Rosalinde Oliveira - CREA 060031/8910

Gerente Técnico do Laboratório Tork SP

Ensaio de Ensaio: de 18 a 19 de Janeiro de 2021.

Emissão do Relatório: São Paulo, 25 de Janeiro de 2021.

TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA.
TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP 01137-000 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br

TORK

LABORATÓRIO DE ENSAIO

DE MATERIAIS LTDA.

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 21014715 SVSP - Rev. 1

FL 1/1

Empresa interessada: JOÃO FELIPE MARTINS

Pedido de ensaio : 289565

Natureza do trabalho : ENSAIO DE TRACÇÃO

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

INSPEÇÃO / DATA: 07/01/2021 - Enregue no Laboratório Tork Barra Funda

IDENTIFICAÇÃO: Cúbico 25%

QUANTIDADE DE AMOSTRAS: 03 amostras de peça impressas em 3D com material de PLA + Fibra de Carbono

PROPOSTA TORK Nº: 2009003C-REV.1

LABORATÓRIO DE ENSAIO

DE MATERIAIS LTDA.

CRL 0891

FL 1/1

GRÁFICO - TRACÇÃO

Os resultados apresentados no presente documento têm validade restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA.
TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP 01137-000 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br

TORK

Controla, Monitora e Certifica

LABORATÓRIO DE ENSAIO Nº: 21014716 SVSP – Rev. 2

FL 1/1

Empresa interessada : JOÃO FELIPE MARTINS

A/EXO

Relatório de Ensaio

Empresa interessada : JOÃO FELIPE MARTINS

A/EXO

Relatório de Ensaio

Empresa interessada : JOÃO FELIPE MARTINS

A/EXO

Relatório de Ensaio

Relatório de Ensaio Nº: 21014716 SVSP – Rev. 2

Relatório de Ensaio Nº: 21014716 SVSP – Rev. 2

Relatório de Ensaio Nº: 21014716 SVSP – Rev. 2

Relatório de Ensaio Nº: 21014716 SVSP – Rev. 2

Relatório de Ensaio Nº: 21014716 SVSP – Rev. 2

Relatório de Ensaio Nº: 21014716 SVSP – Rev. 2

1 - ENSAIO DE TRAÇÃO									
ENSAIO DE TRAÇÃO									
CP	Dimensões mm	Seção ¹ mm²	Carga Máxima N	Alongamento na Ruptura mm	Alongamento na Ruptura %	Alongamento na Ruptura mm	Alongamento na Ruptura %	Módulo MPa	
13	19,029 x 9,918	188,730	3,505	18,57	1,039	2,078	5,53	11,06	1,755
14	19,034 x 9,943	189,255	3,576	18,90	1,109	2,218	5,60	11,21	1,668
15	19,029 x 9,923	188,825	3,540	18,75	1,087	2,174	4,93	9,86	1,699
Média	--	--	--	18,74	1,078	2,157	5,35	10,71	1,707
Desvio Padrão	--	--	--	0,165	0,0358	0,0716	0,368	0,740	44,095

Nota¹: A seção transversal corresponde as dimensões externas dos corpos de prova, sem considerar as configurações de preenchimento interno.

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

- Procedimentos Tork P-838.
- Ensaio realizado conforme: Norma ASTM D638, ed. 2014.
- Ensaio realizado: a uma temperatura ambiente (23 ± 2) °C.
- Local do Ensaio: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - Barra Funda - São Paulo / SP - Laboratório de Produtos.
- Revisão 2: Foi corrigido o alongamento na ruptura, conforme solicitação do cliente via e-mail em 22/02/2021, sendo que este cancela e substitui o Relatório de Ensaio Nº 21014716 SVSP – Rev. 1.
- Equipamentos utilizados:
Tensímetro Digital, Identificação Tork 4833 - Certificado EBC/ABSI CAL 183388/20 - válido até 03/2021
Máq. universal de ensaios, Identificação Tork 4868 - Certificado EBC/Dinastec DNTT/215c/20 - válido até 08/2021
Célula de Carga 3kN, Identificação Tork 4871 - Certificado EBC/Dinastec DNTT/215c/20 - válido até 08/2021
Extensômetro Eletromecânico Barra Deformação, Identificação Tork 5339 - Certificado EBC/Dinastec DNTT/214c/20 - válido até 08/2022

Data dos Ensaio: de 18 a 19 de Janeiro de 2021.
Emissão do Relatório: São Paulo, 23 de Fevereiro de 2021.

Eng. Bruno Ota S. R. de Oliveira - CREA 26056280/78
Chefe do Laboratório de Testes em Produtos
Eng. Leopoldo Rosalin de Oliveira - CREA 0600318910
Gerente Técnico do Laboratório Tork SP
Laboratório de Ensaio acreditado pela CCORE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL-0891.
Os resultados apresentados no presente documento têm validade somente se aplicados somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução ou uso para fins não autorizados, sem nenhuma alteração.

TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA.
TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP 01137-000 - Tel/Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel/Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br

PP-008.2 - Rev.0

PA

